

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE COLCHÃO DRENANTE  
CONSTITUÍDO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS**

**RONALDO VILELA WANDERLEY NETO**

**ORIENTADOR: ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc**

**COORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA / DF: JUNHO / 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE COLCHÃO DRENANTE  
CONSTITUÍDO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS**

**RONALDO VILELA WANDERLEY NETO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**JUAN FELIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**LUCAS PARREIRA DE FARIA BORGES, MSc (UnB)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, JUNHO DE 2017.**

**BRASÍLIA/DF, 27 de Junho de 2017.**  
**FICHA CATALOGRÁFICA**

NETO, RONALDO VILELA WANDERLEY

Análise Experimental e Numérica de Colchão Drenante Constituído de Agregados Siderúrgicos

vi, 86 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                         |                                  |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1. Colchão Drenante     | 2. Drenagem Rodoviária           |
| 3. Agregado Siderúrgico | 4. Análise Experimental          |
| 5. Análise Numérica     | 6. Método das Diferenças Finitas |
| I. ENC/FT/UnB           | II. Bacharel em Engenharia Civil |

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

NETO, RONALDO VILELA WANDERLEY (2017) Análise Experimental e Numérica de Colchão Drenante Constituído de Agregados Siderúrgicos. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTORES: Ronaldo Vilela Wanderley Neto

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise Experimental e Numérica de Colchão Drenante Constituído de Agregados Siderúrgicos.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

---

Ronaldo Vilela Wanderley Neto

SQSW 300, Bl. M, Apto. 508 – Brasília, DF

70673-046

## RESUMO

As indústrias siderúrgicas e da construção civil são frequentemente criticadas quanto aos seus papéis no desenvolvimento sustentável do país devido, entre outros motivos, ao grande volume de resíduos produzidos e à grande quantidade de agregados naturais demandados. Logo, como tentativa de amenizar este problema, surge um estudo focando na reutilização de resíduos da indústria siderúrgica (agregado siderúrgico) para a confecção de estruturas de drenagem (colchão drenante) em rodovias. Este trabalho faz parte do referido estudo e visa fazer um análise experimental e numérica de um colchão drenante constituído por agregados siderúrgicos. Para tal, construiu-se um protótipo de aço e vidro para possibilitar a confecção do colchão em laboratório, definiu-se os materiais que foram utilizados na estrutura de ensaio, montou-se um sistema hidráulico e estabeleceu-se os procedimentos experimentais a serem adotados. Com os resultados obtidos, então, procedeu-se com uma análise em 1D do fluxo estacionário dentro do protótipo usando a teoria de condutividade hidráulica equivalente e em 2D aplicando-se o Método das Diferenças Finitas. Além destas análises, foram feitas avaliações visuais qualitativas a respeito do aspecto da água antes e depois de sua passagem pelo protótipo e da ocorrência de um material fino que ficou aderido às paredes de vidro. Os resultados obtidos indicam uma grande condutividade hidráulica por parte do material, mas também mostram aspectos que podem ser negativos para o uso em drenagem. Em tais casos, apresenta-se sugestões para trabalhos futuros que possam concluir sobre a eficiência do uso do agregado siderúrgico como colchão drenante.

**Palavras-chave:** Colchão drenante, Drenagem Rodoviária, Agregados Siderúrgico, Análise Experimental, Análise Numérica, Método das Diferenças Finitas.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Heloísa e Luís, pelo apoio em absolutamente tudo.

Aos meu tutores pelo conhecimento e paciência.

À Universidade pela experiência da graduação como um todo.

Ao Ivan e à Superaço, que possibilitaram a construção do equipamento laboratorial.

A todos do consórcio VIA-Conterc, pelo empréstimo de materiais, ajuda na confecção dos elementos e compreensão durante os dias que me ausentei para conduzir este trabalho.

Ao pessoal do setor de equipamentos da VIA Engenharia, que foram os responsáveis pela correta vedação da caixa de vidro.

À Mari, aos amigos de curso e ao Zé Carlos, que sentiram, literalmente, todo o peso deste projeto.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVO GERAL.....	2
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1. DRENAGEM DE PAVIMENTOS.....	4
2.1.1. COLCHÃO DRENANTE.....	5
2.1.1.1. DIMENSIONAMENTO .....	7
2.1.1.2. MATERIAIS.....	8
2.1.1.3. PROCEDIMENTO EXECUTIVO .....	9
2.2. AGREGADO SIDERÚRGICO .....	12
2.2.1. PROCESSO SIDERÚRGICO.....	12
2.2.2. RESÍDUOS E COPRODUTOS SIDERÚRGICOS.....	13
2.2.2.1. ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO.....	14
2.2.2.2. ESCÓRIAS DE ACIARIA.....	15
2.2.3. CONTEXTO BRASILEIRO .....	17
2.2.4. EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS.....	20
2.2.5. COLMATAÇÃO DOS DRENOS CAUSADA PELA ESCÓRIA.....	22
2.2.6. IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELAS ESCÓRIAS.....	22
2.2.7. APLICAÇÃO DO AGREGADO SIDERÚRGICO EM ESTRUTURAS DE DRENAGEM PROFUNDA.....	24
2.3. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EQUIVALENTE .....	24
2.3.1. LEI DE DARCY.....	25
2.3.2. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EQUIVALENTE EM FLUXO VERTICAL.....	26
2.4. FLUXO SATURADO EM 2D .....	27
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
3.1. EQUIPAMENTO LABORATORIAL .....	32
3.1.1. CAIXA DE VIDRO .....	33
3.1.2. SUPORTE METÁLICO MÓVEL.....	36
3.1.3. SISTEMA HIDRÁULICO .....	41
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS.....	47
3.2.1. COLCHÃO DRENANTE E DRENO LONGITUDINAL.....	47
3.2.2. SOLO.....	53
3.2.3. GEOTÊXTEIS .....	54
3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	54
3.3.1. MONTAGEM DO MODELO.....	55
3.3.2. OPERAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	58
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
4.1.1. SIMULAÇÃO DE SUBIDA DO LENÇOL FREÁTICO .....	60
4.1.2. ANÁLISE VISUAL QUALITATIVA.....	61
4.1.3. ANÁLISE 1D DO FLUXO ESTACIONÁRIO.....	63
4.1.4. ANÁLISE 2D DO FLUXO ESTACIONÁRIO.....	67
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>74</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>75</b>

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2. 1</b> – Principais compostos químicos da escória de aciaria (IBS, 1998 apud RESENDE, 2010)	16
<b>Tabela 2. 2</b> - Variação do volume das espécies químicas isoladas (WEAST, 1971, <i>apud</i> MACHADO, 2000)	21
<b>Tabela 2. 3</b> - Parâmetros que influenciam a expansão das escórias (ROHDE,2002, <i>apud</i> MACHADO, 2000)	21
<b>Tabela 2. 4</b> - Ensaio de lixiviação de escória de aciaria LD (SOUZA, 2007)	23
<b>Tabela 2. 5</b> - Ensaio de solubilização de escória de aciaria LD (SOUZA, 2007)	23
<b>Tabela 3. 1</b> - Tamanho e processo de origem das amostras estudadas (MARCHEZINI <i>et al</i> , 2016)	48
<b>Tabela 3. 2</b> - Coeficientes de uniformidade e curvatura das amostras (MARCHEZINI <i>et al</i> , 2016)	48
<b>Tabela 3. 3</b> - Faixas granulométricas das combinações lineares (MARCHEZINI <i>et al</i> , 2016)	49
<b>Tabela 3. 4</b> - Composição das combinações em relação às amostras originais (MARCHEZINI <i>et al</i> , 2016)	49
<b>Tabela 3. 5</b> - Características da amostra C1 (MARCHEZINI <i>et al</i> , 2016)	49
<b>Tabela 3. 6</b> - Quantitativo de agregado siderúrgico necessário e total peneirado por peneira	51
<b>Tabela 3. 7</b> - Características do solo (Fonte: SOLOARTE, 2016)	54
<b>Tabela 4.1</b> - Subida do nível d'água ao longo do tempo	60
<b>Tabela 4.2</b> - Tempos para cálculo de vazão (caixa com a estrutura drenante)	65
<b>Tabela 4.3</b> - Tempos para cálculo de vazão (caixa vazia)	65
<b>Tabela 4.4</b> - Vazões	66
<b>Tabela 4.5</b> – Condutividade hidráulica	66
<b>Tabela 4.6</b> – Condutividade hidráulica (análise 1D)	66
<b>Tabela 4.7</b> – Condutividade hidráulica (análise 2D)	69

## Lista de Figuras

<b>Figura 2. 1</b> – Vista em planta de colchão drenante	6
<b>Figura 2. 2</b> - Vista em planta de drenos "espinha de peixe"	6
<b>Figura 2. 3</b> - Seção de um colchão drenante	7
<b>Figura 2. 4</b> - Espalhamento e compactação do material de um colchão drenante Obra: Trevo de Triagem Norte - Brasília/DF	11
<b>Figura 2. 5</b> - Fluxo do processo de produção (IABr, 2009)	12
<b>Figura 2. 6</b> - Aplicação das escórias de alto-forno (IABr, 2016)	15
<b>Figura 2. 7</b> - Resumo do processo de refino do aço em conversores a oxigênio do tipo LD ou BOF (ARAUJO 1997, <i>apud</i> MACHADO, 2000)	17
<b>Figura 2. 8</b> - Quantidade total de resíduos e coprodutos diretos produzidos no Brasil nos anos indicados	18
<b>Figura 2. 9</b> - Geração de coprodutos e resíduos por tipo (IABr, 2016)	18

<b>Figura 2. 10</b> - Destinação das escórias (IABr, 2016)	19
<b>Figura 2. 11</b> - Aplicação das escórias (IABr,2016)	19
<b>Figura 2. 12</b> – Fluxo vertical em solo heterogêneo em condição saturada	26
<b>Figura 3. 1</b> – Representação 3D da caixa de vidro e estrutura metálica de suporte	32
<b>Figura 3. 2</b> – Dimensões da caixa de vidro (cotas em centímetros)	33
<b>Figura 3. 3</b> – Fabricação da caixa de vidro	34
<b>Figura 3. 4</b> – Vista lateral com posição dos furos (cada um está em um lado da caixa). Cotas em centímetros.	35
<b>Figura 3. 5</b> – Teste de estanqueidade realizado durante 24 horas	35
<b>Figura 3. 6</b> – Detalhes da estrutura da caixa de vidro	36
<b>Figura 3. 7</b> – Perfil usado na confecção do suporte metálico (cotas em centímetros)	37
<b>Figura 3. 8</b> - Representação 3D do suporte metálico	38
<b>Figura 3. 9</b> – Planta com dimensões do suporte metálico (cotas em metros)	38
<b>Figura 3. 10</b> – Vista lateral com dimensões do suporte metálico (cotas em metros)	39
<b>Figura 3. 11</b> – Fabricação suporte metálico	39
<b>Figura 3. 12</b> -Detalhe do rodízio (cotas em metros)	40
<b>Figura 3. 13</b> – Instalação dos rodízios	40
<b>Figura 3. 14</b> – Suporte metálico finalizado	41
<b>Figura 3. 15</b> - Esquema do sistema hidráulico	42
<b>Figura 3. 16</b> - Cotas do sistema hidráulico	43
<b>Figura 3. 17</b> – Sistema hidráulico - detalhes	44
<b>Figura 3. 18</b> – Tubo de drenagem envolto com geotêxtil (esquerda) e sua configuração original (direita)	45
<b>Figura 3. 19</b> – Sensores para monitoramento do nível d'água	46
<b>Figura 3. 20</b> – Configuração espacial do sistema hidráulico	47
<b>Figura 3. 21</b> - Corte do dreno longitudinal DPS-07 (cotas em centímetros)	50
<b>Figura 3. 22</b> – Tubo do dreno longitudinal	51
<b>Figura 3. 23</b> – Obtenção do agragado siderúrgico	52
<b>Figura 3. 24</b> – Geotêxteis utilizados	54
<b>Figura 3. 25</b> – Montagem do modelo	56
<b>Figura 3. 26</b> - Esquema do modelo (cotas em centímetros)	57
<b>Figura 3. 27</b> – Operação do protótipo	59
<b>Figura 4. 1</b> – Gráfico da relação entre o nível da linha d'água e o tempo decorrido desde o início do experimento	61
<b>Figura 4.2</b> – Ocorrência de material fino aderido às paredes do protótipo	62
<b>Figura 4. 3</b> - Solubilidade do material fino em água	62
<b>Figura 4.4</b> – Aspecto visual da água	63
<b>Figura 4.5</b> – Representação do modelo proposto	64
<b>Figura 4.6</b> – Ensaio sem material	65
<b>Figura 4.7</b> – Condição de Dirichlet	68
<b>Figura 4.8</b> – Condição de Neumann	68
<b>Figura 4.9</b> – Carga hidráulica	70
<b>Figura 4.10</b> – Carga hidráulica (escala de cores) e fluxo (vetores)	70
<b>Figura 4.11</b> – Carga hidráulica e fluxo (vista em planta)	71
<b>Figura 4.12</b> – Carga hidráulica e fluxo (modelo 3D)	71
<b>Figura 4.13</b> – Vetores de velocidade	72
<b>Figura 4.14</b> – Vetores de velocidade (vista em planta)	72

## Lista de Siglas

**ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas

**COBRAMSEG 2016** – XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

**CPRM** – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil)

**DNER** – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

**DNIT** – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

**DPS** – Dreno Profundo em Solo

**IABr** – Instituto Aço Brasil

**IBS** – Instituto Brasileiro de Siderurgia

**PEAD** – Polietileno de Alta Densidade

**PNCT** – Plano Nacional de Contagem de Tráfego

**PPG / UnB** – Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília

**UnB** – Universidade de Brasília

**VMD** – Volume Médio Diário

## Lista de Símbolos

**q** – Vazão

**k** – Condutividade hidráulica

**A** – Área

**i** – Gradiente hidráulico

**b ou L** – Largura

**H** – Altura / Espessura

**C<sub>u</sub>** – Condição de unifomidade

**C<sub>c</sub>** – Coeficiente de curvatura

**h** – Carga hidráulica

**u** – Pressão total

**γ<sub>a</sub>** – Peso específico da água

**v** – Velocidade

**g** – Aceleração da gravidade

**Z** – Carga altimétrica

**i<sub>eq</sub>** – Gradiente hidráulico equivalente

**k<sub>eq</sub>** – Condutividade hidráulica equivalente

**V** – Volume

**$\rho$**  – Massa específica

**$m$**  – Massa

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO**

Obras de pavimentação rodoviária geralmente são contestadas por parte da população por seus impactos no meio ambiente. Como exemplos desses impactos citam-se o desmatamento, a alteração das condições de relevo do terreno, a redução da infiltração de água no solo e a demanda elevada por agregados naturais para construção da estrutura do pavimento.

Paralelamente, a indústria siderúrgica brasileira também sofre críticas quanto ao seu papel no desenvolvimento sustentável do país. Isso se deve, entre outros fatores, à grande quantidade de resíduos que são gerados no processo de fabricação do aço. Em 2015, segundo o Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil (IABr), as indústrias siderúrgicas produziram 19,8 milhões de toneladas de resíduos e coprodutos (materiais resultantes do processo siderúrgico para os quais existem tecnologias de reaproveitamento).

Com intuito de trazer uma solução para parte de ambos os problemas, diversas pesquisas sobre a reutilização dos resíduos siderúrgicos na construção de rodovias surgiram nas últimas décadas. As mesmas focaram-se principalmente na utilização de agregados siderúrgicos em misturas asfálticas e em bases e sub-bases de pavimentos. Recentemente, observou-se que tais agregados também poderiam ser usados em estruturas de drenagem de rodovias, particularmente em colchões drenantes, e é neste contexto que surge a produção deste trabalho.

Para o emprego do agregado siderúrgico em colchões drenantes, há necessidade de se estudar as propriedades relevantes a essa utilização do material. As mais importantes seriam a permeabilidade, para avaliar se o fluxo da água no material é satisfatório, a expansão, devido ao fato dessa propriedade acarretar em problemas para toda a estrutura do pavimento, e potencial de entupimento dos drenos, visto que já se sabe que o material, devido à sua composição química, pode desencadear

reações que formam substâncias que se precipitam e atrapalham o funcionamento da drenagem. Este estudo foca principalmente na análise experimental do fluxo de água, visando avaliar todas as propriedades mencionadas acima durante o processo.

Dito isso, e considerando que ainda não existem estudos aprofundados sobre o tema a nível mundial (Marchezini *et al.*, 2016), optou-se por realizar experimentos em um protótipo que comporta meia seção de estrada em escala geométrica reduzida para analisar o fluxo de água. Deste modo, observou-se o comportamento da água no colchão drenante feito com agregados siderúrgicos pela primeira vez, ressaltando que o protótipo foi construído com material transparente para possibilitar a visualização do fluxo. Além disso, os dados coletados servirão como complementos para estudos mais amplos sobre o tema e podem ser relevantes se a tecnologia proposta começar a ser utilizada em escala real.

## **1.2. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste estudo é desenvolver e analisar experimental e numericamente a viabilidade de se utilizar agregados siderúrgicos na confecção de um colchão drenante através de um protótipo.

## **1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para o objetivo geral ser atingido, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- (1) Definir um procedimento experimental para viabilizar a análise do fluxo de água no colchão drenante;
- (2) Desenvolver e construir o protótipo e todo o sistema de ensaio;
- (3) Escolher, baseado na literatura, o tipo e a faixa granulométrica de agregado siderúrgico a ser utilizado na confecção do colchão drenante;



(4) Coletar e analisar os dados obtidos a fim de complementar os estudos sobre a viabilidade do uso de resíduos de mineração em estruturas de drenagem profunda de rodovias.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. DRENAGEM DE PAVIMENTOS**

A drenagem de um pavimento visa defendê-lo de águas que possam danificá-lo. No Brasil, justifica-se o uso de estruturas de drenagem quando se tem uma altura pluviométrica anual maior do que 1500 milímetros e em estradas com Volume Médio Diário (VMD) de veículos comerciais maior do que 500(DNIT, 2006). De acordo com o Atlas Pluviométrico do Brasil, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) levando em conta dados coletados entre 1977 e 2006, nota-se que a maior parte do território nacional está situado entre isoietas maiores do que 1500 mm. Além disso, considerando informações provenientes do Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), elaborado pelo DNIT, temos que parte considerável da malha rodoviária federal apresenta um VMD de veículos comerciais maior do que 500. Logo, verifica-se que sistemas de drenagem de pavimentos são necessários no contexto nacional.

De maneira geral, as águas que podem prejudicar o pavimento são provenientes de infiltrações diretas causadas por chuvas e de lençóis d'água subterrâneos. As estruturas que objetivam a prevenção de problemas causados pela água de origem pluvial são chamadas de dispositivos de drenagem superficial e subsuperficial, sendo que os mais usados são a camada drenante e drenos rasos longitudinais. Já aquelas estruturas que previnem danos causado pelas águas provenientes de lençóis e do fenômeno conhecido como “franja capilar”, quando água ascende do lençol à estrutura do pavimento por capilaridade, são chamadas de dispositivos de drenagem subterrânea (DNIT, 2006).

Neste estudo, focaremos na segunda classe mencionada. Segundo Marchezini *et al.* (2016), além do rebaixamento do lençol freático, a drenagem profunda ainda mantém a umidade de equilíbrio compatível com as condições de tráfego, o desempenho estrutural e a estabilidade de taludes. Usualmente, a boa prática de engenharia sugere que o lençol freático deve ser mantido a profundidades maiores do que 1,50 a 2,00

metros do subleito da rodovia (DNIT, 2006). Para isto, podem ser usados diversos dispositivos, dos quais citam-se:

- Drenos profundos;
- Drenos espinha de peixe;
- Colchão drenante;
- Drenos horizontais profundos;
- Valetões laterais;
- Drenos verticais de areia.

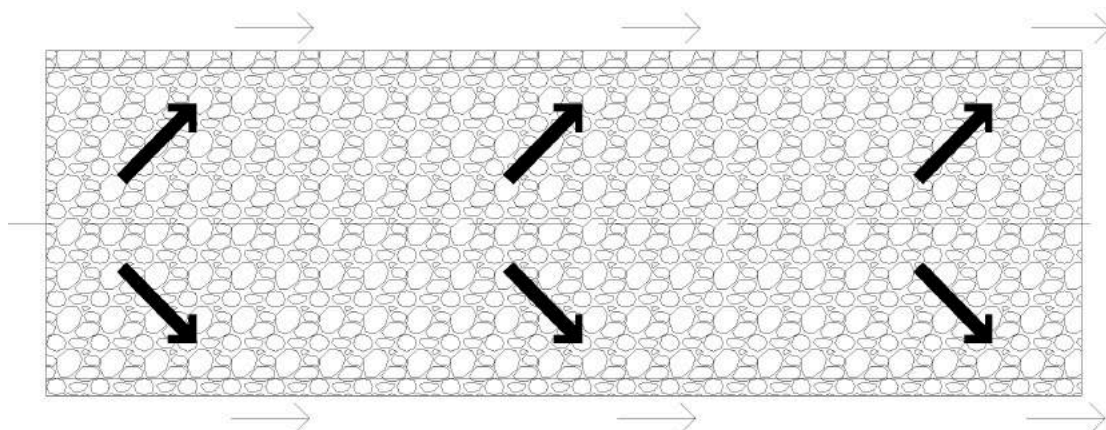
Cada um destes dispositivos tem características específicas, tendo vantagens e desvantagens dependendo da situação de campo. De modo a elaborar um bom projeto de drenagem subterrânea, o engenheiro deve ter informações sobre:

- Topografia da região;
- Geologia e pedologia, com obtenção de amostras por meio de diversos tipos de sondagem;
- Pluviometria da área.

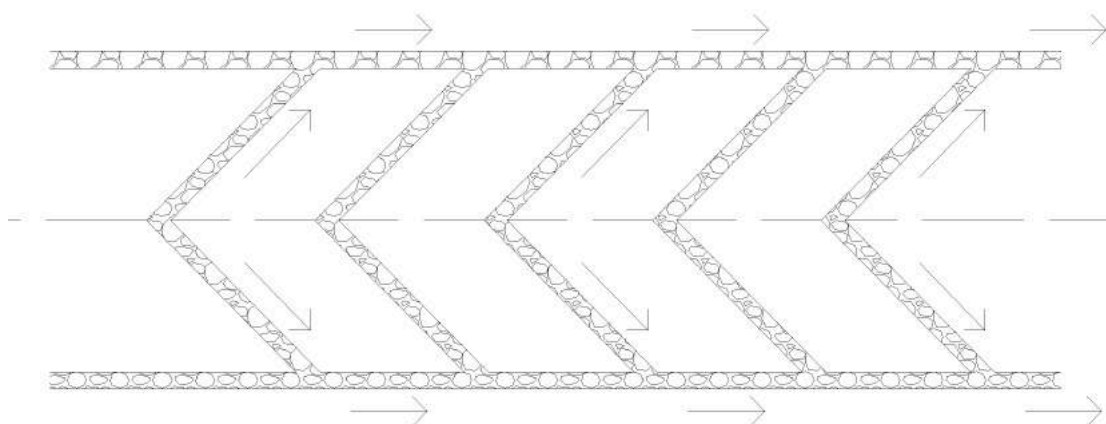
Dito isso, focaremos no dispositivo do tipo colchão drenante, por ser este o tema deste trabalho.

### **2.1.1. COLCHÃO DRENANTE**

São camadas que objetivam drenar as águas situadas abaixo do pavimento, podendo receber contribuições de grandes áreas (DNIT, 2006), como esquematizado na Figura 2.1. Normalmente, são utilizados quando a vazão não for passível de ser drenada somente por drenos espinha de peixe (Figura 2.2), uma vez que esta segunda técnica utiliza menos material e, em consequência, é mais econômica.



**Figura 2.1 – Vista em planta de colchão drenante**



**Figura 2.2- Vista em planta de drenos "espinha de peixe"**

O Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2016) aconselha que o colchão drenante deve ser usado em:

- Cortes em rocha;
- Cortes nos quais o lençol freático estiver próximo ao greide de terraplenagem;
- Base de aterros nos quais houver água livre próximo ao terreno natural;
- Aterros sobre terrenos impermeáveis.

O manual versa ainda que a remoção das águas interceptadas pelos colchões deverá ser feita por drenos longitudinais, como indicado na Figura 2.1.

### 2.1.1.1. DIMENSIONAMENTO

Segundo o mesmo manual mencionado anteriormente, o dimensionamento de colchões drenantes, por se tratarem de meio poroso, deve levar em conta as seguintes considerações:

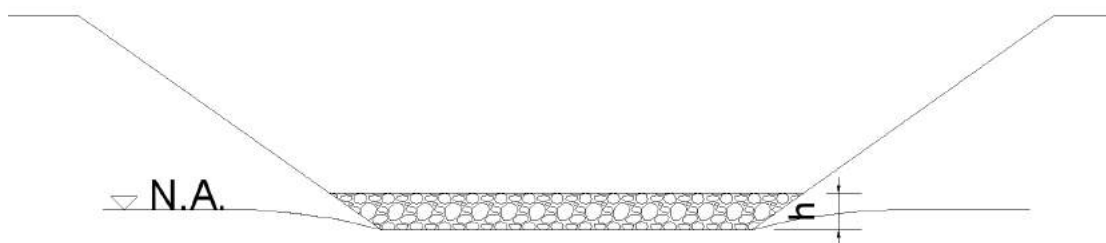
- Volume de água que escoar pela camada em uma faixa de 1,0 metro de largura e 1,0 metro de comprimento, na direção do fluxo, até os limites da bacia de contribuição ( $q$ ) ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- O gradiente hidráulico do fluxo ( $i$ ) poderá ser substituído pela declividade da camada ( $\text{m}/\text{m}$ ).
- O coeficiente de permeabilidade da camada ( $k$ ) ( $\text{m}/\text{s}$ ) deverá atender à demanda de vazão a ser drenada.

Uma vez conhecidos esses elementos, procede-se com o cálculo da espessura da camada utilizando a lei de Darcy, representada pela Equação (2.1).

$$q = k \cdot A \cdot i \quad (2.1)$$

Encontra-se, primeiramente, o valor de  $A$  (área da seção transversal da camada). Como a largura ( $b$ ) considerada para determinação da vazão foi de 1,0 metro, tem-se que o valor encontrado para a área é igual a espessura necessária ( $H$ ) para o colchão (Figura 2.3).

$$H = \frac{A}{b} = A \quad (2.2)$$



**Figura 2.3** - Seção de um colchão drenante

### 2.1.1.2. MATERIAIS

Os colchões drenantes são constituídos de material drenante e, quando necessário, material filtrante. Segundo o Manual de Drenagem de Rodovias do DNIT (2016), materiais drenantes têm a função de captar e conduzir as águas drenadas, com granulometria adequada à vazão demandada, geralmente sendo usadas britas, cascalho grosso lavado e rachão. Já os materiais filtrantes permitem o escoamento da água sem o carreamento de finos, evitando assim o fenômeno de colmatção, e por isso estão, normalmente, na interface entre solo e colchão drenante. Em alguns casos, a interface se dá entre colchão e algum material inerte como, por exemplo, material britado de grandes dimensões, não sendo necessária a implantação de filtros. A maioria dos materiais utilizados como materiais filtrantes são areia, agregados britados e mantas geotêxtil.

Ainda de acordo com o Manual (DNIT, 2006), a granulometria e outras considerações sobre os materiais drenantes e filtrantes são obtidas pelo processo de Terzaghi, pelas determinações do *Bureau of Reclamation e do Soil Conservation Service* e, quando usados geotêxteis, pelo método do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas.

As recomendações de Terzaghi são as que seguem, nas quais  $d_x$  se refere ao diâmetro (mm) abaixo do qual está situada  $x\%$  da massa da amostra:

- Condição de permeabilidade

$$d_{15 \text{ filtrante}} \geq 5 d_{15 \text{ solo}} \quad (2.3)$$

(máximo de 5% passando em peneira número 200)

- Condição de não entupimento do material filtrante

$$d_{15 \text{ filtrante}} \leq 5 d_{85 \text{ solo}} \quad (2.4)$$

$$d_{15 \text{ filtrante}} \leq 40 d_{15 \text{ solo}} \quad (2.5)$$

$$d_{50 \text{ filtrante}} \leq 25 d_{50 \text{ solo}} \quad (2.6)$$

- Condição de uniformidade ( $C_u$ )

$$2 \leq \frac{d_{60 \text{ filtrante}}}{d_{10 \text{ filtrante}}} \leq 20 \quad (2.7)$$

Além das recomendações apresentadas acima, existe uma que versa sobre condições de não entupimento do tubo. Entretanto, levando em consideração que colchões drenantes são drenos cegos (DNIT – ES, 2006), ou seja, sem tubos, esta recomendação não será relevante para este trabalho.

Complementarmente, Marchezini *et al.* (2016) argumenta que, para materiais permeáveis, o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) deve respeitar os seguintes limites:

$$0,63 < C_c < 1,64 \quad (2.8)$$

sendo que

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (2.9)$$

A norma 015/2016 do DNIT – ES ressalta que quando a granulometria do material a ser utilizado no colchão drenante está definida, não é permitida a mistura com materiais diferentes, a fim de garantir a permeabilidade de projeto. Uma medida para assegurar que não ocorrerá tal mistura é armazenar separadamente os materiais e depositá-los em pilhas ou baias que impeçam sua contaminação.

#### 2.1.1.3. PROCEDIMENTO EXECUTIVO

Esta seção foi baseada na norma 015/2016 DNIT – ES e em técnicas comumente utilizadas em campo, observadas em diversas obras do Brasil. Para a execução do colchão drenante são necessários os seguintes equipamentos:

- Retroescavadeira;
- Caminhão basculante;
- Pá carregadeira;
- Rolo compactador metálico.

É possível que, devido a condições específicas de cada obra, seja necessária uma quantidade maior de equipamentos.

O processo inicia-se com a escavação do terreno até a cota de fundo do colchão usando a retroescavadeira. Caso o terreno seja rochoso, é necessária a utilização de equipamento específico ou explosivos para o corte. Deve-se seguir a largura, o alinhamento e as cotas indicadas no projeto.

Em seguida, os caminhões basculantes com material de preenchimento do colchão são descarregados no local do corte. Este material é espalhado com ajuda da pá carregadeira ou mesmo da concha da retroescavadeira.

Finalmente, quando o material de preenchimento está completamente espalhado, procede-se com a compactação da camada com rolos metálicos. Ressalta-se que a umidade adequada para um bom adensamento das camadas deve ser observada. Repete-se este processo para quantas camadas forem necessárias para se chegar a cota de topo do colchão. Como indicado no item 2.1.1, deve-se construir, também, drenos longitudinais para a remoção das águas interceptadas.

É importante frisar que as medidas de manejo ambiental necessárias devem ser implementadas como, por exemplo, a remoção de material excedente advindo do corte e transporte do mesmo para local autorizado pela fiscalização, a execução de obras de proteção nas áreas de deságue dos drenos e o monitoramento dos maciços nos quais foram instalados a drenagem subterrânea.





**Figura 2. 4** - Espalhamento e compactação do material de um colchão drenante. Obra: Trevo de Triagem Norte - Brasília/DF

Além disso, o processo deve ser controlado por meio de levantamentos topográficos e, qualitativamente, por inspeções visuais. As dimensões das seções transversais não podem diferir mais de 1% em relação às dimensões de projeto e as medidas de espessura devem se situar no intervalo de  $\pm 10\%$  em relação às espessuras de projeto.

## 2.2. AGREGADO SIDERÚRGICO

O agregado siderúrgico é advindo do processo de produção do aço, sendo obtido após o beneficiamento de algumas escórias formadas ao longo da fabricação do aço. Este agregado vem sendo usado em diversas aplicações, como em bases e sub-bases de pavimentos, misturas asfálticas e leitos de estradas de ferro. Entretanto, uma grande quantidade de resíduos produzidos pelas indústrias siderúrgicas ainda não é reutilizada (MARCHEZINI *et al.*, 2016).

Esta seção destina-se a apresentar o processo de produção do aço, os tipos de resíduos e coprodutos, sobretudo as escórias, o contexto brasileiro no que se refere ao âmbito da geração de resíduos atualmente e a utilização do agregado siderúrgico em estruturas de drenagem profunda.

### 2.2.1. PROCESSO SIDERÚRGICO

O processo é geralmente separado em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação (IABr, 2009).

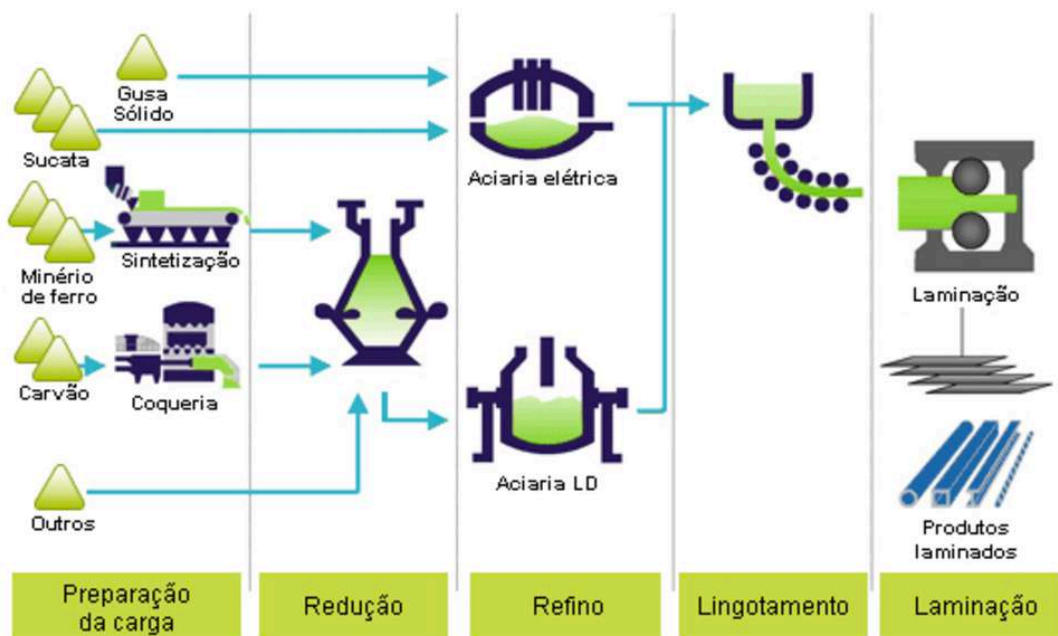


Figura 2.5 - Fluxo do processo de produção (IABr, 2009)

A primeira etapa consiste na aglomeração dos finos do minério de ferro, que é utilizado como matéria prima no processo, formando o sinter, e na transformação do

carvão em coque, na coqueria. A aglomeração é possível devido ao uso de cal e finos do próprio coque.

A segunda etapa, ou redução, começa com o carregamento do alto-forno com as matérias primas já preparadas. Em seguida, oxigênio a uma temperatura superior a 1000°C é soprado pelo fundo do alto-forno, reagindo com o carvão que, por sua vez, produz energia suficiente para fundir o minério de ferro. O carvão também age como redutor, associando-se ao oxigênio do minério de ferro, que se desprende do ferro quando está em altas temperaturas. Assim, o ferro fica livre de oxigênio e em estado líquido, formando o que se conhece por ferro gusa. Outras impurezas, como sílica e calcário, formam as escórias de alto-forno, que são utilizadas como matéria prima na fabricação de cimento.

A terceira etapa, o refino, é transformar o ferro gusa e a sucata de ferro e aço em aço líquido. Isso é feito em aciarias a oxigênio ou elétricas, cada uma com suas especificidades, descritas no item 2.2.2. O carbono e algumas impurezas são removidas do ferro gusa nessa parte do processo, formando o aço propriamente dito e as escórias de aciaria. O aço líquido passa então para a fase sólida em equipamentos de lingotamento transformando-se em semi-acabados, lingotes e blocos.

Estes produtos do lingotamento são processados por laminadores na quarta e última fase, a laminação. Eles dão origem a vários tipos de produtos, com formas, composições químicas e aplicações distintas.

### **2.2.2. RESÍDUOS E COPRODUTOS SIDERÚRGICOS**

Todos os materiais obtidos no processo siderúrgico, com exceção do próprio aço, são considerados resíduos. Para alguns desses resíduos, já foram desenvolvidas tecnologias que possibilitam seu emprego em alguma área, agregando valor ao que antes era um passivo ambiental e evitando assim sua disposição final em meios que possam ser ambientalmente perigosos. Tais resíduos são então chamados de coprodutos (IABr, 2016).

Os resíduos assumem as mais variadas formas, cabendo citar, entre outros, a escória, a lama e o pó de alto-forno, a escória, a lama grossa e a lama fina de aciaria, a escória de dessulfuração e a carepa.

Tendo em mente o objetivo deste trabalho e considerando que ao longo da execução do mesmo lidaremos majoritariamente com as escórias, será feito um breve aprofundamento sobre este tipo de resíduo a seguir.

#### 2.2.2.1. ESCÓRIAS DE ALTO-FORNO

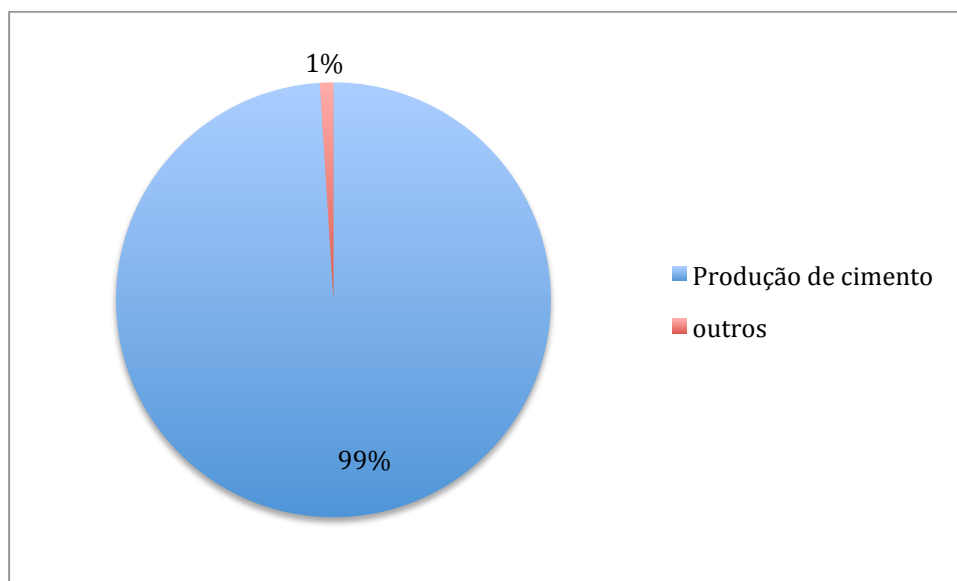
Advinda da segunda etapa do processo siderúrgico, ou seja, da redução, esta escória é constituída principalmente por aluminossilicatos cálcicos. Dependendo do tipo de resfriamento e de sua composição química, as escórias de alto-forno são classificadas em granuladas e não granuladas.

As escórias de alto-forno granuladas ocorrem quando estas são submetidas a um resfriamento rápido na saída do forno, possibilitado por jatos d'água de alta pressão. Esta classe de escória de alto-forno tem diâmetro máximo de 5 mm e 95% em peso passando na peneira de 4,8 mm.

Já as escórias de alto-forno não granulares são obtidas quando o resfriamento é lento, normalmente ao ar livre, viabilizando a formação de cristais. Este produto é hidraulicamente inerte e não possui uma faixa granulométrica bem definida.

Há ainda indústrias que submetem a escória de alto-forno ao processo de britagem, sendo estas classificadas de acordo com as normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em função da resultante do peneiramento.

Devido às suas propriedades físico-químicas, as escórias de alto-forno vêm sendo largamente utilizadas na indústria cimenteira, não sendo muito aproveitada em obras de pavimentação justamente por já possuir um mercado consolidado (RESENDE, 2010).



**Figura 2.6** - Aplicação das escórias de alto-forno (IABr, 2016)

Entretanto, estas escórias podem ser usadas em obras de pavimentação desde que seguidas as recomendações da Norma (DNER-EM 260, 1994 e DNER-PRO 261, 1994), ressaltando que somente as escórias não granulares podem ser usadas na regularização de subleito, sub-bases, bases e revestimentos flexíveis, enquanto ambas podem ser empregadas na camada de revestimento dos pavimentos rígidos (RESENDE, 2010).

#### 2.2.2.2. ESCÓRIAS DE ACIARIA

Essas escórias são obtidas na terceira etapa do processo siderúrgico, ou seja, no refino. Os diferentes tipos de processo empregados nesta etapa da produção do aço resultam em escórias distintas, cabendo citar as de fornos Siemens-Martin (OH), as de conversores a oxigênio (LD ou BOF) e as de forno de arco elétrico (EAF).

Na Tabela 2.1 é possível observar qual é a composição química das escórias no Brasil, Japão e Alemanha. Os dados mostram um alto teor de óxidos, fato que deve ser analisado de acordo com a aplicação imaginada devido ao caráter expansivo de tais elementos.

**Tabela 2.1** – Principais compostos químicos da scoria de aciaria (IBS, 1998 apud RESENDE, 2010)

<b>MÉDIAS DOS PRINCIPAIS COMPOSTOS QUÍMICOS DA ESCÓRIA DE ACIARIA (%)</b>			
<b>ELEMENTO QUÍMICO (%)</b>	<b>PAÍS</b>		
	<b>BRASIL</b>	<b>JAPÃO</b>	<b>ALEMANHA</b>
Óxido de cálcio (CaO)	23 - 46	42 - 44	48 - 54
Óxido de Magnésio (MgO)	5 - 13	3 - 7	1 - 4
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	11 - 15	11 - 14	11 - 18
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,8 - 4	1 - 2	1 - 4
Ferro total (Fe total)	14 - 22	18 - 21	14 - 19

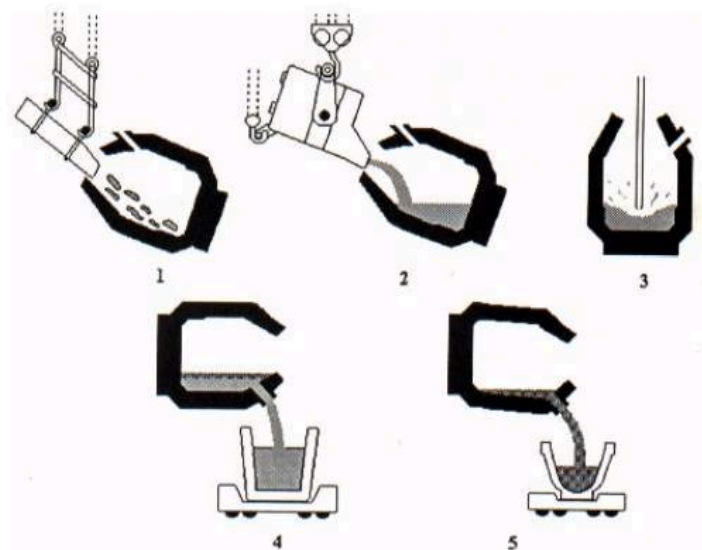
O processo OH (Open Hearth) consiste na injeção de oxigênio na mistura de sucata metálica, calcário e minério de ferro, a fim de provocar a fusão e agitação do banho metálico. Atualmente encontra-se em desuso pela baixa produtividade garantida pelo processo.

As escórias advindas deste processo são compostas majoritariamente por óxidos, uma vez que a cal virgem (CaO) é utilizada para a remoção do fósforo na fase de refino (MACHADO, 2000).

Outro tipo de escória são as que advêm do processo de refino em conversores a oxigênio LD (Linz-Donawitz) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*), que objetiva a redução do teor de carbono e outros elementos como silício e enxofre no ferro gusa.

No início do processo, sucata e gusa líquido são inseridos no conversor (Figura 2.7 – 1 e 2), no qual, posteriormente, é introduzida uma lança que sopra oxigênio a velocidades supersônicas (Figura 2.7 – 3). Após a fusão completa do material, adiciona-se cal virgem para remoção das impurezas e dolomito (CaCO<sub>3</sub>.MgCO<sub>3</sub>) para proteger o recobrimento refratário do forno. Procede-se então com o basculamento do conversor para retirada do aço e das escórias, que ficam separadas devido à diferença de densidade (Figura 2.7 – 4 e 5).

Portanto, a escória resultante é uma mistura entre CaO e MgO com os elementos indesejados do gusa e da sucata (MACHADO, 2000).



**Figura 2.7** - Resumo do processo de refino do aço em conversores a oxigênio do tipo LD ou BOF (ARAÚJO 1997, *apud* MACHADO, 2000)

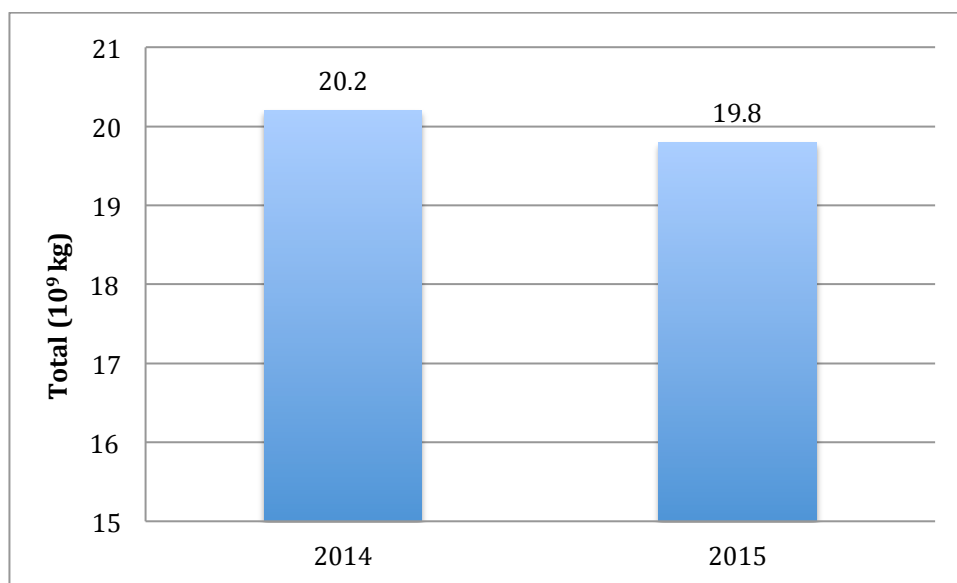
As últimas escórias a serem citadas neste trabalho são as do processo EAF que, segundo MACHADO (2000), baseia-se na fusão de sucata de aço a partir de um arco elétrico, sendo este formado entre o aço e eletrodos de grafita ou carvão amorfo. Após a fusão, injeta-se oxigênio por meio de uma lança para provocar as reações de oxidação do carbono, silício e fósforo. Da mesma maneira que acontece nos conversores a oxigênio, procede-se com adição de CaO, MgO e, especificamente neste tipo de forno, a fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) para acelerar as reações de refino, formando as escórias compostas por silicatos e óxidos.

Tais escórias são classificadas em oxidante e redutora. A oxidante é produzida pela injeção de oxigênio na sucata fundida, enquanto que a redutora é formada após o vazamento da oxidada, por conta da adição de CaO e  $\text{CaF}_2$  (KAMON *et al.*, 1993 *apud* MACHADO, 2000).

### 2.2.3. CONTEXTO BRASILEIRO

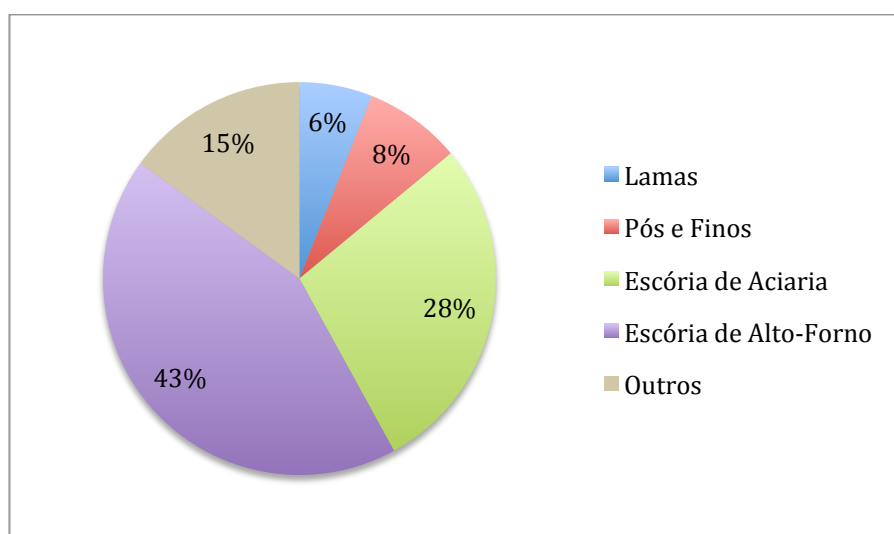
Atualmente no Brasil, são produzidos, anualmente, em torno de 20 milhões de toneladas de resíduos e coprodutos diretos do processo siderúrgico. A nomenclatura de “resíduos e coprodutos diretos” se dá por conta da mudança na metodologia de coleta de dados por parte do IABr. Antigamente, consideravam-se todos os resíduos relacionados às siderúrgicas na contagem, incluindo resíduos de setores administrativos, refeitórios e obras de construção civil. Agora, são levados em conta

na coleta de dados somente os resíduos que estão diretamente relacionados à produção do aço (IABr, 2016).



**Figura 2.8** - Quantidade total de resíduos e coprodutos diretos produzidos no Brasil nos anos indicados

Os principais resíduos gerados, em termos quantitativos, são as escórias, compondo 71% do total quando somadas as de aciaria e de alto-forno. A Figura 2.9 mostra a geração de coprodutos e resíduos no Brasil por tipo em 2015.

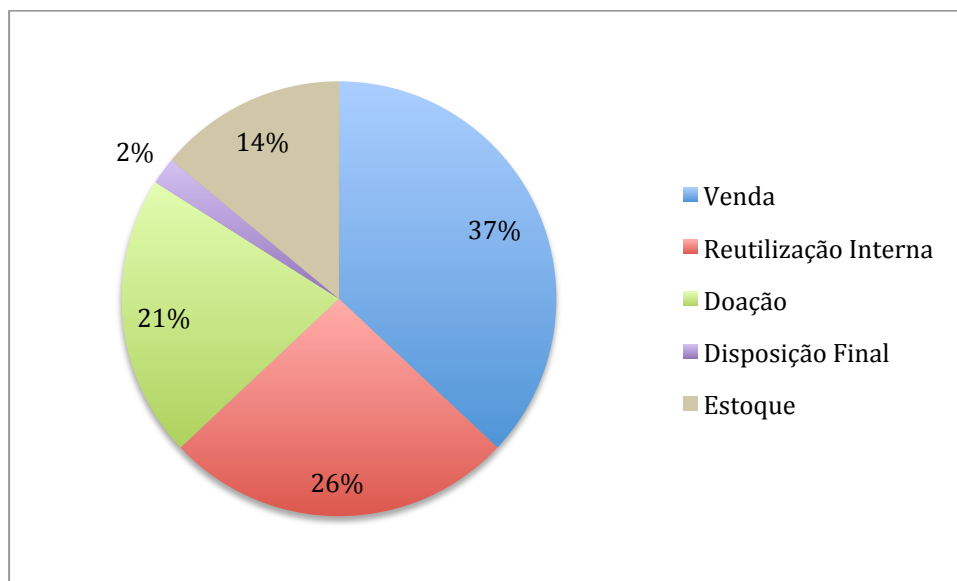


**Figura 2.9** - Geração de coprodutos e resíduos por tipo (IABr, 2016)

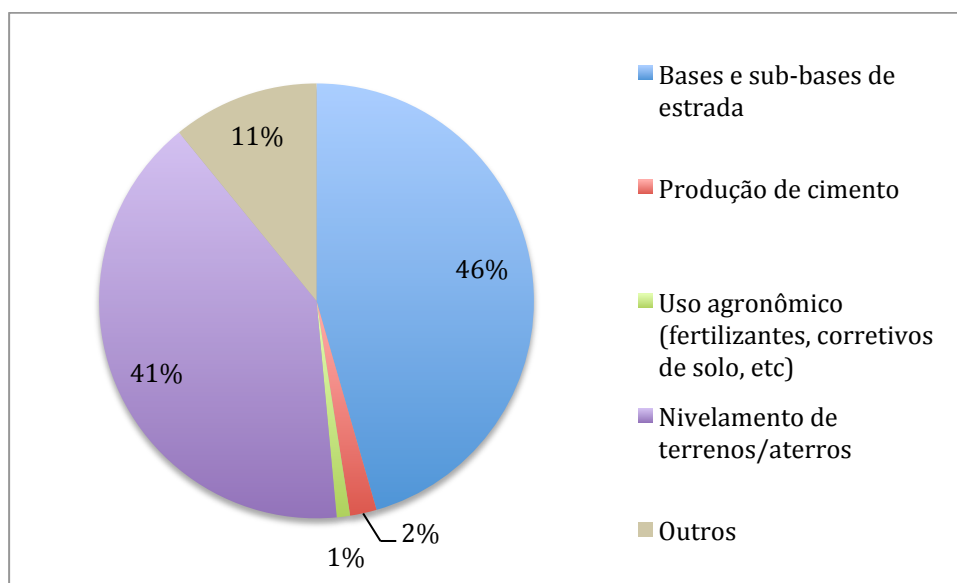
Segundo o relatório de sustentabilidade da IABr (2016), a maior parte das escórias de alto-forno é vendida para a indústria cimenteira, como visto no item 2.2.2.1. Já outros tipos de escória, incluindo a de aciaria, dessulfuração e lingotamento contínuo, têm mais diversidade quanto à maneira de reuso. A Figura 2.10 mostra como divide-



se a destinação destas escórias, enquanto a Figura 2.11 expõe a aplicação das mesmas, no ano de 2015.



**Figura 2.10** - Destinação das escórias (IABr, 2016)



**Figura 2.11** - Aplicação das escórias (IABr, 2016)

Observa-se na Figura 2.11 que a soma da fração que fica estocada com a fração que vai para sua disposição final é de 16% do total, ou seja, aproximadamente 3,17 milhões de toneladas de escória. Além disso, percebe-se que sua aplicação é concentrada em dois tipos de serviço: bases e sub-bases de estradas e nivelamento de terrenos/aterros, somando 87% do total das aplicações.

Isso mostra que as indústrias ainda não conseguem reaproveitar todas as escórias produzidas no processo siderúrgico, e que há espaço para a diversificação das

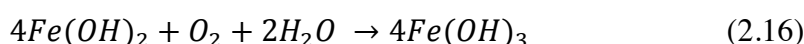
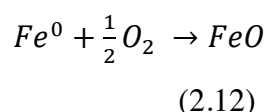
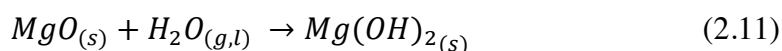
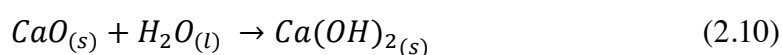
aplicações desses coprodutos. Este fato é atestado pela indicação de que 52,1% das indústrias siderúrgicas nacionais investem em inovação tecnológica para desenvolvimento de novas aplicações e 78,6% se importam em desenvolver novos mercados para potencializar a venda de resíduos e coprodutos (IABr, 2016).

#### 2.2.4. EXPANSIBILIDADE DAS ESCÓRIAS

A expansão das escórias é um dos grandes problemas encontrados nos estudos de aplicabilidade deste coproduto. Quando usadas como material constituinte da estrutura da rodovia ou do revestimento asfáltico, a variação de seu volume pode causar danos ao pavimento como trincas radiais, fissuração longitudinal, solevações transversais e longitudinais e deslocamento rotacional da sarjeta (RESENDE, 2010).

As escórias de alto-forno podem ou não apresentar comportamentos expansivos, dependendo da sua forma de obtenção. Enquanto escórias de alto-forno granuladas possuem propriedades hidráulicas latentes, as não granuladas são um produto sem atividade hidráulica (RESENDE, 2010).

Já as escórias de aciaria possuem características expansivas devido, entre outros fatores, à hidratação da cal livre (Equação 2.10) e do periclásio (Equação 2.11) e da oxidação (Equações 2.12, 2.13 e 2.14) e corrosão (Equações 2.15 e 2.16) do ferro metálico residual (MACHADO, 2000).



As variações de volume ocasionadas pelas reações acima são mostradas na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Variação do volume das espécies químicas isoladas (WEAST, 1971, *apud* MACHADO, 2000)

<b>Fórmula</b>	<b>Nome</b>	<b>Variação de volume (%)</b>
CaO	Cal	<b>Em relação ao CaO</b>
Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandita	99,4
MgO	Periclásio	<b>Em relação ao MgO</b>
Mg(OH) <sub>2</sub>	Brucita	119,5
Fe <sup>0</sup>	Ferro metálico	<b>Em relação ao Fe<sup>0</sup></b>
FeO	Wüstita	77,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita	328,7
Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido ferroso	271,7

Sabe-se também que alguns parâmetros influenciam positivamente (↑) ou negativamente (↓) as reações que provocam expansão. Esses estão apresentados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** - Parâmetros que influenciam a expansão das escórias (ROHDE, 2002, *apud* MACHADO, 2000)

<b>Espécie química</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Mecanismo</b>
CaO e MgO	Teor da espécie no estado livre (↑)	Hidratação e Carbonatação
	Umidade (↑)	
	Temperatura (↑)	
	Teor de CO <sub>2</sub> (↑)	
	Tamanho dos grãos de escória (↓)	
Fe <sup>0</sup>	Teor de Fe <sup>0</sup> (↑)	Oxidação e Corrosão
	Umidade (↑)	
	Tempo de exposição ao ar (↑)	
	Teor de oxigênio no resfriamento (↓)	
	Tamanho dos grãos de escória (↓)	

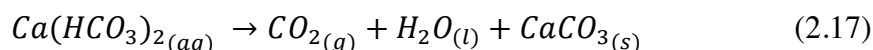
O controle da expansão das escórias se dá por meio do processo de cura, que, no Brasil, geralmente consiste em estocá-la por um período de no mínimo seis meses. Assim, as reações descritas nas Equações (2.10) a (2.16) ocorrem no pátio das siderúrgicas e as escórias já estarão estabilizadas quando forem utilizadas (RESENDE, 2010).

### 2.2.5. COLMATAÇÃO DOS DRENOS CAUSADA PELA ESCÓRIA

ROHDE (2002) ressalta que um problema que deve ser considerado quando utiliza-se as escórias em pavimentos é a ocorrência de tufa. Esta é uma forma do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) precipitado, que pode obstruir os sistemas de drenagem das rodovias, causando deterioração acelerada do pavimento.

Segunda a mesma autora, o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), formado pela interação entre a água e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) proveniente da atmosfera e das emissões dos veículos, reage com o hidróxido de cálcio formado pela reação descrita na Equação (2.10), chegando-se ao bicarbonato de cálcio em um meio aquoso  $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]_{(\text{aq})}$ .

Na saída dos sistemas de drenagem, em condições de alta temperatura, a solução de bicarbonato de cálcio sofre a reação descrita na Equação (2.17), ocorrendo a deposição da tufa.



Assim, os principais fatores controladores da deposição de tufa nos drenos seriam a concentração de cal livre, água e dióxido de carbono, a temperatura e a umidade (GUPTA *et al*, 1994, *apud* ROHDE, 2002).

### 2.2.6. IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO PELAS ESCÓRIAS

Apesar dos vários benefícios ambientais já citados que a utilização de resíduos como alternativa ao uso de agregados naturais traz, deve-se atentar à possibilidade de ocorrência de danos ao meio ambiente. O principal impacto ambiental devido à utilização dos agregados minerais em pavimentos é a solubilização de substâncias nocivas presentes em sua composição (GIDLEY E SACK, 1984, *apud* ROHDE, 2002).

Segundo RESENDE (2010), para avaliar tal impacto, são empregados os ensaios de lixiviação, descrito pela NBR 10005 (ABNT, 2004), e de solubilização, indicado na NBR 10006 (ABNT, 2004). Através dos resultados desses dois ensaios, classifica-se os resíduos conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004).

O ensaio de lixiviação consiste na separação de certas substâncias inorgânicas contidas nos resíduos industriais por meio de lavagem ou percolação. O ensaio de solubilização, por sua vez, consiste na obtenção de um extrato solubilizado dos resíduos e a posterior análise do teor de diversas substâncias (RESENDE, 2010).

SOUZA (2007) realizou estes ensaios com escórias de aciaria de USIMINAS, obtendo como resultado a classificação II A (não perigoso – não inerte). Observou-se que o teor de alumínio na amostra solubilizada estava acima do permitido. A seguir, tem-se as Tabelas 2.4 e 2.5, com os resultados dos ensaios.

**Tabela 2. 4** - Ensaio de lixiviação de escória de aciaria LD (SOUZA, 2007)

<b>PARÂMETRO</b>	<b>LIMITE MÁXIMO PERMITIDO (mg/L)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO NO RESÍDUO LIXIVIADO (mg/L)</b>
Arsênio	1,0	< 0,01
Bário	70,0	< 0,005
Cádmio	0,5	< 0,001
Chumbo	1,0	< 0,01
Cromo total	5,0	< 0,01
Fluoretos	150,0	3,70
Mercúrio	0,1	< 0,0002
Prata	5,0	< 0,01
Selênio	1,0	< 0,01

**Tabela 2. 5** - Ensaio de solubilização de escória de aciaria LD (SOUZA, 2007)

<b>PARÂMETRO</b>	<b>LIMITE MÁXIMO PERMITIDO (mg/L)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO MEI (mg/L)</b>
Arsênio	0,01	< 0,01
Bário	0,70	0,06
Cádmio	0,005	< 0,001
Chumbo	0,01	< 0,01
Cianeto	0,07	< 0,01
Cromo total	0,05	< 0,01
Fenóis totais	0,01	< 0,001
Fluoretos	1,50	1,0
Mercúrio	0,001	< 0,0002
Nitrato	10,0	< 0,05
Prata	0,05	< 0,01
Selênio	0,01	< 0,01
Alumínio	0,20	0,61
Cloreto	250,0	< 2,0
Cobre	2,0	< 0,01
Ferro	0,3	< 0,05

Manganês	0,1	0,02
Sódio	200,0	11,80
Surfactantes	0,5	< 0,10
Sulfato	250,0	1,62
Zinco	5,0	< 0,01

### **2.2.7. APLICAÇÃO DO AGREGADO SIDERÚRGICO EM ESTRUTURAS DE DRENAGEM PROFUNDA**

Em um recente estudo publicado no XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2016), MARCHEZINI *et al* (2016) apontam que não existem registros bibliográficos a nível mundial sobre o uso de agregados siderúrgicos como material drenante em obras rodoviárias.

No mesmo estudo, os autores fazem uma análise sobre a viabilidade do emprego do material em colchões drenantes, focando sobretudo na granulometria e nos requisitos de Terzaghi para materiais drenantes apresentados no item 2.1.1.2. Chega-se à conclusão que é possível o uso dos agregados siderúrgicos em sistemas de drenagem caso as siderúrgicas passem a fornecer uma faixa granulométrica adequada aos critérios de dimensionamento desses sistemas.

Portanto, observa-se que ainda faltam estudos sobre outras propriedades importantes do material, sobretudo estudos focados em amostras com faixas granulométricas adequadas aos sistemas de drenagem profunda. Entre outras, cita-se a expansibilidade, o potencial de colmatação dos drenos e a solubilidade e lixiviação.

## **2.3. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EQUIVALENTE**

A maneira como a água se comporta no solo depende de diversos fatores. Entre eles, pode-se citar a permeabilidade e homogeneidade do solo e as condições de carga impostas ao fluido.

Neste trabalho, como visto no item 4.1.3, utilizou-se da teoria da condutividade hidráulica equivalente, em um fluxo vertical, na tentativa de se calcular a permeabilidade do material que estava dentro do protótipo. Isso possibilitou levar-se

em conta as diversas perdas de carga que são impostas ao escoamento devido às conexões do sistema, chegando-se a um resultado mais preciso.

### 2.3.1. LEI DE DARCY

A carga hidráulica da água no solo ( $h$ ), ou seja, a energia total em um ponto do fluido, pode ser expressa segundo a formulação de Bernoulli e é apresentada na Equação 2.18.

$$h = \frac{u}{\gamma_a} + \frac{v^2}{2g} + Z \quad (2.18)$$

Na Equação 2.18, a carga hidráulica ( $h$ ) é dada em  $m$ , a pressão total ( $u$ ) é dada em  $kN/m^2$ , o peso específico da água ( $\gamma_a$ ) é dado em  $kN/m^3$ , a velocidade ( $v$ ) é dada em  $m/s$ , a aceleração da gravidade ( $g$ ) em  $m/s^2$  e a carga altimétrica ( $Z$ ) é dada em  $m$ . O primeiro termo da soma corresponde à carga piezométrica, o segundo à carga cinética e o terceiro, como já mencionado, à carga altimétrica.

Em 1856, Darcy, realizando um experimento para analisar as propriedades do fluxo de água através de uma camada de areia, descobriu que a velocidade do fluxo que passa pela amostra era linearmente proporcional à razão entre a diferença de carga hidráulica e o comprimento da amostra ( $\Delta h/L$ ), também chamada de gradiente hidráulico ( $i$ ). A constante de proporcionalidade foi batizada de condutividade hidráulica ( $k$ ). Essa formulação é conhecida como lei de Darcy e está descrita na Equação 2.19, na qual a velocidade do fluxo ( $v$ ) é dada em  $m/s$ , a condutividade hidráulica ( $k$ ) em  $m/s$  e o gradiente hidráulico ( $i$ ) em  $m/m$ .

$$\vec{v} = \vec{k}i \quad (2.19)$$

O gradiente hidráulico, por sua vez, pode ser descrito em termos diferenciais da seguinte forma:

$$\vec{i} = \left( \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.20)$$

### 2.3.2. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EQUIVALENTE EM FLUXO VERTICAL

Considerando um fluxo vertical de água através de um solo saturado composto por diversas camadas, cada uma delas com condutividades e gradientes hidráulicos diferentes, é possível estabelecer parâmetros equivalentes que representem o escoamento neste solo, considerando-o como um meio homogêneo.

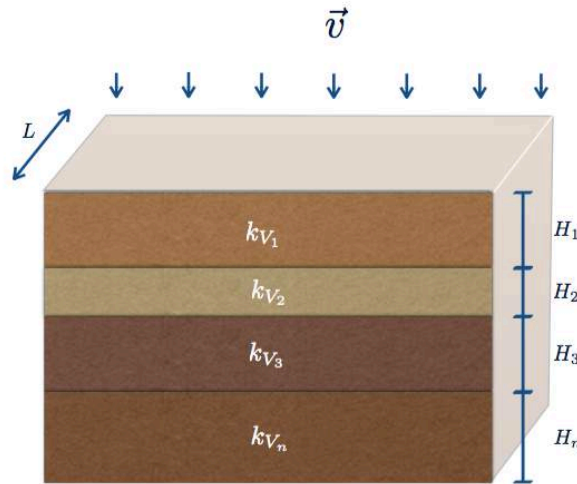


Figura 2. 12 – Fluxo vertical em solo heterogêneo em condição saturada

Sabe-se que a vazão ( $q$ ) é igual ao produto da velocidade do escoamento ( $v$ ) pela área da seção ( $A = L \cdot H$ ), como está descrito na Equação 2.21.

$$q = vLH \quad (2.21)$$

Uma vez que a água é incompressível e o solo se encontra saturado, tem-se que:

$$v = v_1 = v_2 = v_3 = v_n \quad (2.22)$$

Ou seja, a velocidade do escoamento é igual para todas as camadas na direção vertical. Também é verdade que, como o fluxo total passa por todas as camadas, a carga total  $h$  é a soma das cargas de cada camada (Equação 2.23).

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + h_n \quad (2.23)$$



Uma vez que o gradiente hidráulico é a carga pelo comprimento, tem-se que o gradiente hidráulico equivalente pode ser escrito como:

$$i_{eq} = \frac{h}{H} \quad (2.24)$$

Onde  $H$  representa a soma das alturas de cada camada da Figura 2.12. Considerando a lei de Darcy (Equação 2.19), chega-se a Equação 2.25.

$$\frac{v}{k_{eq}} = \frac{h}{H} \quad (2.25)$$

Substituindo  $h$  pelo resultado da Equação 2.23, aplicando a lei de Darcy mais uma vez na carga hidráulica de cada camada e tendo em mente que as velocidades de cada camada são iguais, tem-se a Equação 2.26.

$$k_{eq} = \frac{H}{\frac{H_1}{k_1} + \frac{H_2}{k_2} + \frac{H_3}{k_3} + \frac{H_n}{k_n}} \quad (2.26)$$

Logo, percebe-se que a condutividade hidráulica equivalente de um solo saturado durante um fluxo vertical de água é uma média harmônica ponderada, cujos pesos são as respectivas alturas de cada camada.

## 2.4. FLUXO SATURADO EM 2D

O fluxo saturado em solos obedece a equação da conservação sem os termos de geração e variação temporal. Sendo assim, pode-se descrever o fluxo de água no solo a partir de um laplaciano da carga hidráulica (DAS, 2007):

$$\nabla^2 h = 0 \quad (2.27)$$

Ou também, pode ser descrita como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.28)$$

A fim de obter uma solução de fluxo saturado para o ensaio proposto, pode-se fazer uso de uma descrição numérica que represente a Equação 2.28 discretamente. Logo, é necessário fazer uso da expansão polinomial de Taylor para a equação da conservação. Dessa forma, a expansão bidimensional de Taylor, para duas dimensões, até a ordem  $n$  pode ser descrita como Weir (2009) propõe:

$$h(x + \Delta x, y + \Delta y) = h(x, y) + \left( \Delta x \frac{\partial h}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \Big|_{(x,y)} + \dots + \frac{1}{n!} \left( \Delta x \frac{\partial}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial}{\partial y} \right)^n h \Big|_{(x,y)} \quad (2.29)$$

Considerando-se apenas a primeira ordem de diferenciação da expansão da Equação 2.29, tem-se:

$$h(x + \Delta x, y + \Delta y) \simeq h(x, y) + \left( \Delta x \frac{\partial h}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \Big|_{x,y} \quad (2.30)$$

Pode-se utilizar a Equação 2.30 para descrever a aproximação do diferencial em  $x$  e em  $y$ , em avanço, respectivamente:

$$\frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \simeq \frac{h_{i+1}^k - h_i^k}{\Delta x} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial h(x, y)}{\partial y} \simeq \frac{h_i^{k+1} - h_i^k}{\Delta y} \quad (2.32)$$

E, em atraso, respectivamente:

$$\frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \simeq \frac{h_i^k - h_{i-1}^k}{\Delta x} \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial h(x, y)}{\partial y} \simeq \frac{h_i^k - h_i^{k-1}}{\Delta y} \quad (2.34)$$

Semelhantemente, a segunda derivada pode ser aproximada da seguinte forma, para  $x$ :

$$\frac{\partial^2 h(x, y)}{\partial x^2} \simeq \frac{\frac{h_{i+1}^k - h_i^k}{\Delta x} - \frac{h_i^k - h_{i-1}^k}{\Delta x}}{\Delta x} \quad (2.35)$$

$$(2.36) \quad \frac{\partial^2 h(x, y)}{\partial x^2} \simeq \frac{h_{i+1}^k - 2h_i^k + h_{i-1}^k}{\Delta x^2}$$

E da seguinte forma, para  $y$ :

$$\frac{\partial^2 h(x, y)}{\partial y^2} \simeq \frac{\frac{h_i^{k+1} - h_i^k}{\Delta y} - \frac{h_i^k - h_i^{k-1}}{\Delta y}}{\Delta y} \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial^2 h(x, y)}{\partial y^2} \simeq \frac{h_i^{k+1} - 2h_i^k + h_i^{k-1}}{\Delta y^2} \quad (2.38)$$

Fazendo uso das Equações de discretização, pode-se chegar à seguinte equação, que rege o fenômeno estacionário:

$$h_i^k = \frac{h_{i+1}^k + h_{i-1}^k + h_i^{k+1} + h_i^{k-1}}{4} \quad (2.39)$$

Ao aplicar a Equação 2.39 iterativamente ao longo de uma malha, é possível calcular o valor da carga hidráulica.

Todavia, a Equação 2.39 é válida apenas para o domínio do problema. Faz-se, portanto, necessário haver condições de contorno que definam o comportamento ao longo da fronteira do problema. As duas condições tratadas no presente estudo são as condições de Neumann e Dirichlet.

A condição de contorno de Neumann descreve o caso em que há um fluxo constante ou quando a fronteira é impermeável. Matematicamente, tal condição é descrita como uma igualdade entre uma função escalar e a primeira derivada da carga hidráulica no espaço, como descrito nas Equações 2.40 e 2.41.

$$\nabla h = (f(x, y), g(x, y)) \quad (2.40)$$

$$\left( \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right) = (f(x, y), g(x, y)) \quad (2.41)$$

Pela discretização em diferenças finitas, pode-se descrever as condições de contorno de Neumann em x e em y, respectivamente, como:

$$\frac{h_{i+1}^n - h_i^n}{\Delta x} = f \quad (2.42)$$

$$\frac{h_i^{n+1} - h_i^n}{\Delta y} = g \quad (2.43)$$

No caso impermeável, as funções escalares f e g são nulas, logo, as seguintes expressão passam a ser válidas:

$$h_{i+1}^n = h_i^n \quad (2.44)$$

$$h_i^{n+1} = h_i^n \quad (2.45)$$

Ou seja, o nó de fronteira e o nó justaposto à fronteira possuem o mesmo valor de carga hidráulica, no caso impermeável.

Os nós do domínio que são justapostos à fronteira necessitam de ter uma formulação numérica distinta da apresentada. Para encontrar a formulação que satisfaz à modelagem física, basta combinar a Equação 2.39 às Equações 2.44 e 2.45. Dessa forma, pode-se obter, para cada caso de contorno uma expressão única, a depender da direção do nó impermeável.

A outra condição de contorno, utilizada no presente estudo, é a condição de Dirichlet. Nessa condição a carga hidráulica tem um valor constante, igual a uma função escalar do tipo:

$$h(x, y) = p(x, y) \quad (2.46)$$

Discretamente, pode-se descrevê-la como:

$$h_i^k = p \quad (2.47)$$

### 3. METODOLOGIA

Apresenta-se, neste capítulo, o equipamento desenvolvido para a realização dos experimentos, assim como os materiais que foram utilizados.

As normas, procedimentos e recomendações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) serão referências para a condução deste trabalho, ainda que não serão seguidas rigorosamente devido às condições específicas impostas pelo equipamento construído.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental e no INFRALAB, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da UnB (Universidade de Brasília). Este estudo é feito em conjunto com Marchezini (2016) e constitui uma das linhas de pesquisa sobre o uso de materiais alternativos em obras de pavimentação. Cabe mencionar que tal pesquisa é fruto da parceria entre o Instituto Aço Brasil (IABr), o DNIT e a UnB.

#### 3.1. EQUIPAMENTO LABORATORIAL

Para possibilitar a condução dos experimentos, foi desenvolvido um equipamento para acomodar e mover a estrutura do colchão drenante e do pavimento, além de um sistema hidráulico simples para simular as condições de campo (subida do lençol). O equipamento pode ser, então, separado em três partes: caixa de vidro, estrutura metálica para suporte da caixa e sistema hidráulico.

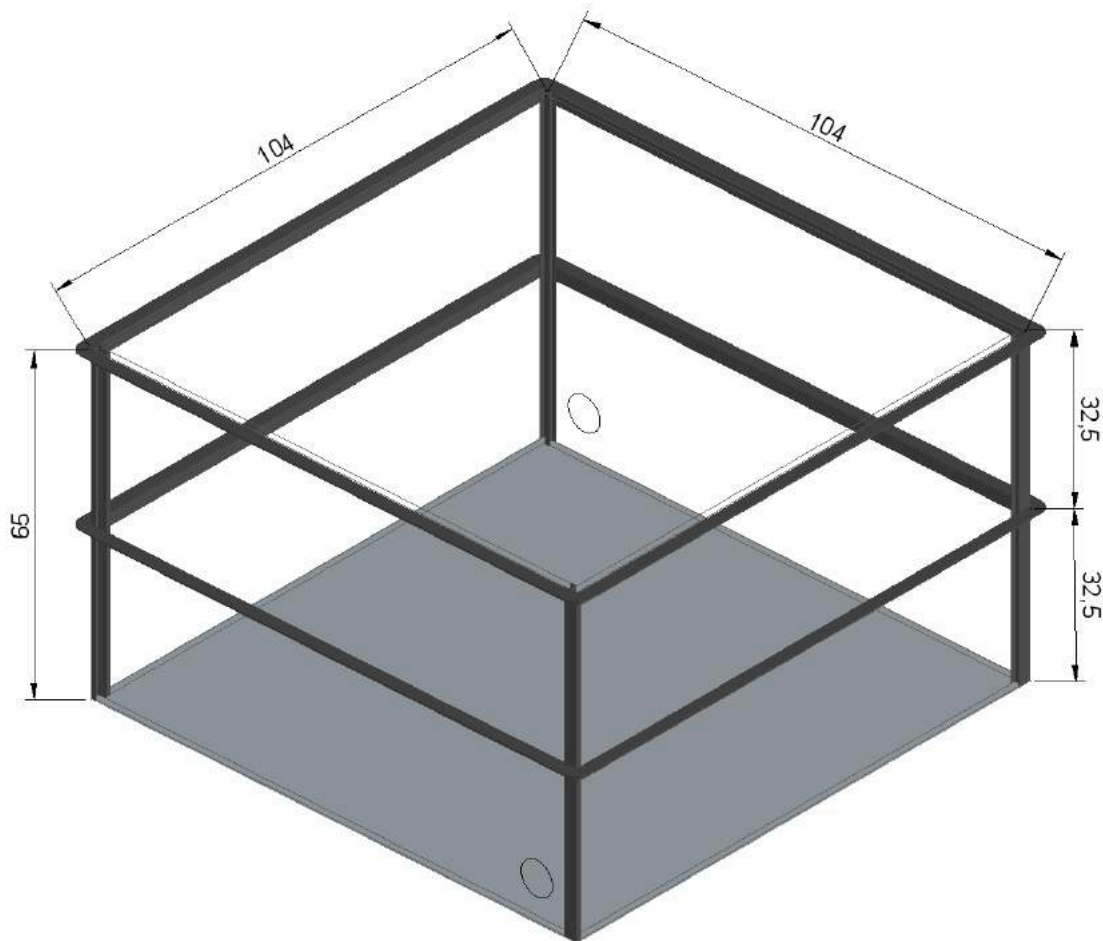


**Figura 3.1** – Representação 3D da caixa de vidro e estrutura metálica de suporte

### 3.1.1. CAIXA DE VIDRO

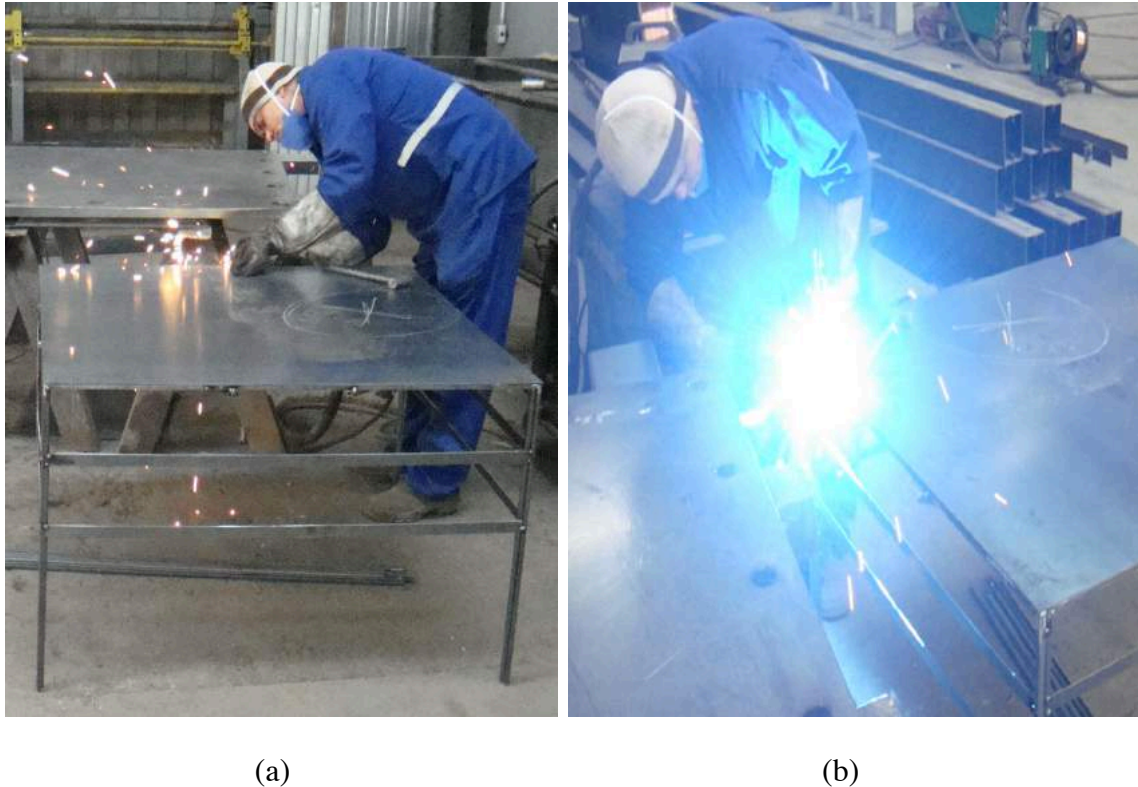
A caixa do protótipo foi confeccionada a partir de perfis em U e cantoneiras de aço com 2 mm de espessura e, como base, uma chapa de aço de 1,4 mm de espessura.

As dimensões da caixa são 1,04 x 1,04 x 0,65 m, como é possível observar na Figura 3.2, garantindo assim uma área em planta de 1 m<sup>2</sup> para o pavimento. Além disso, há dois travamentos da caixa feitos com cantoneiras de 2 mm de espessura, sendo o primeiro a 32,5 cm do fundo da caixa e o segundo a 65 cm.



**Figura 3. 2** – Dimensões da caixa de vidro (cotas em centímetros)

Todas as partes metálicas são soldadas entre si, acabadas com lixadeira (Figura 3.3) e pintadas com tinta antioxidante de cor branca.



**Figura 3.3** – Fabricação da caixa de vidro. As tiras metálicas mostradas nas fotos serviram unicamente de apoio durante a fabricação e foram retiradas assim que o travamento foi concluído. (a) Acabamento com lixadeira. (b) Solda da chapa de base com cantoneira inferior.

Os vidros são do tipo temperado com espessura de 10 mm, conforme as recomendações do fabricante para o uso previsto da estrutura, sendo quatro folhas de 1,04 x 0,65 m para as laterais e uma de 1,02 x 1,02 m para o fundo. Existem, ainda, dois furos de 34 mm para permitir a entrada e saída de água (Figura 3.4). Estes estão simetricamente posicionados em lados opostos da caixa, sendo que um servirá como entrada de água e o outro, com o mesmo diâmetro, está situado um pouco mais acima do fundo, e funcionará como dreno. O diâmetro dos furos foi feito em função da flange que utilizou-se para funcionar como registro, mais detalhada no item 3.1.3.

A vedação da caixa foi feita com silicone para vidro e metais na parte interna e, externamente, com um selante elástico indicado para juntas que possam ter movimentação, que é o caso do trabalho pois as grandes cargas impostas à estrutura podem forçar as junções entre os vidros e elementos de aço. Para garantir a vedação do conjunto, realizou-se um teste de estanqueidade durante 24 horas, como pode ser visto na Figura 3.5.





**Figura 3.4** – Vista lateral com posição dos furos (cada um está em um lado da caixa). Cotas em centímetros.



**Figura 3.5** – Teste de estanqueidade realizado durante 24 horas



(a)



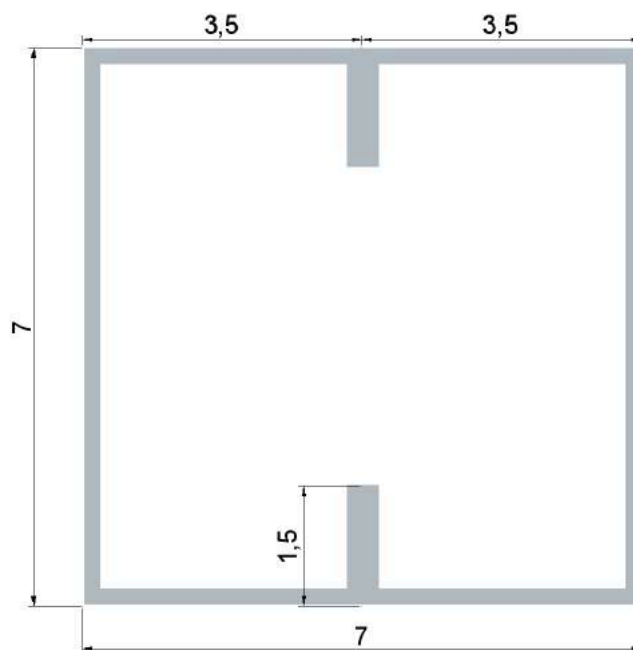
(b)

**Figura 3.6** – Detalhes da estrutura da caixa de vidro. (a) Vista lateral na qual pode-se ver a chapa do fundo e a cantoneira de travamento a meia altura. (b) Vista em planta detalhando os perfis em U e a cantoneira de travamento superior. Observa-se, também, o silicone vedando a interface vidro/aço

### 3.1.2. SUPORTE METÁLICO MÓVEL

A função da estrutura descrita a seguir é suportar a caixa de vidro e todo o material contido dentro dela, conferindo estabilidade e mobilidade para o protótipo como um todo.

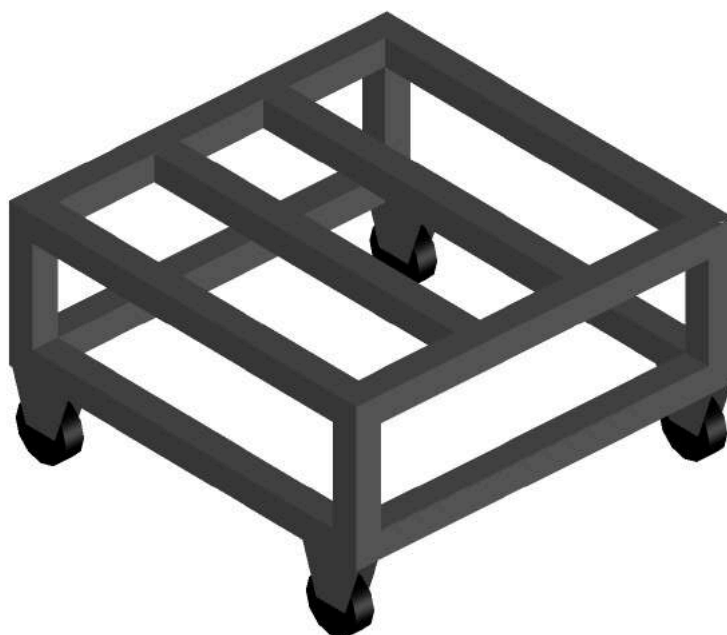
Ela foi construída com perfis caixa de aço, que são compostos de dois perfis U enrijecidos soldados (Figura 3.7), de seção de 7 x 7 cm, com 2 mm de espessura. O fabricante recomendou este tipo de seção levando em conta o peso estimado do modelo (item 3.3.1) e a altura deste suporte metálico, uma vez que com elevadas cargas e grande esbeltez surge o problema da flambagem.



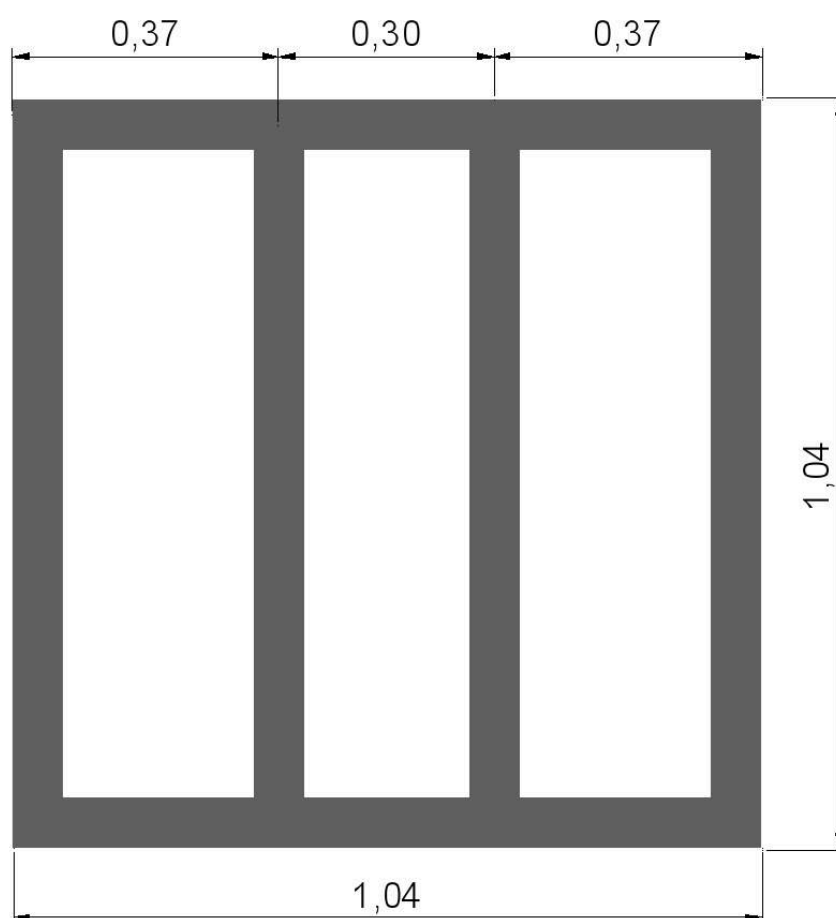
**Figura 3.7** – Perfil usado na confecção do suporte metálico (cotas em centímetros)

A configuração dos tubos de aço é em formato de paralelepípedo com dimensões de 1,04 x 1,04 x 0,40 m. A área da planta de 1,04 x 1,04 m foi decidida para concordar com a caixa de vidro. A altura de 40 cm foi escolhida a fim de deixar o equipamento com uma altura total menor do que 1,40 m, cota na qual haverá uma interferência com a torre de chuva, componente do sistema hidráulico que será usado em estudos futuros. A Figura 3.8 mostra uma representação do suporte metálico.

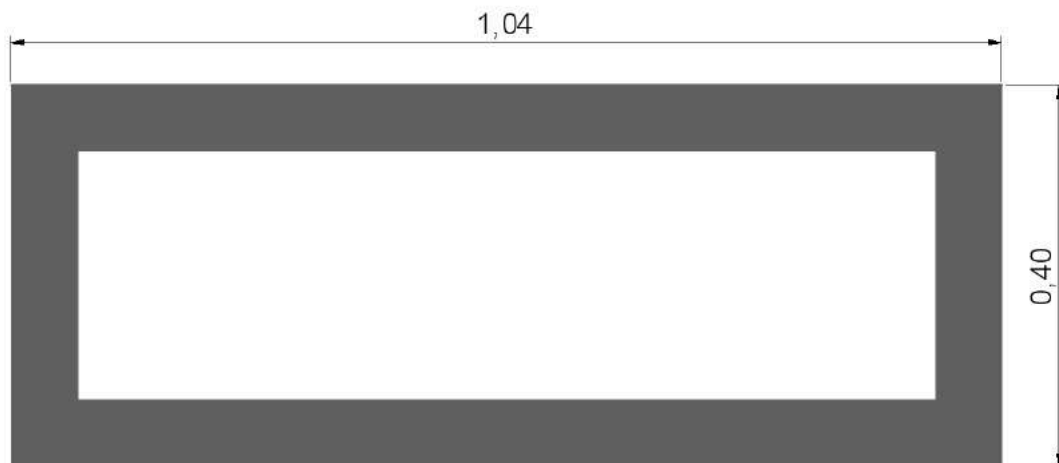
Nota-se que existem dois tubos adicionais na parte de cima do suporte. Estes existem para garantir uma distribuição satisfatória do peso do material que vem sobre o suporte. As dimensões podem ser vistas nas Figuras 3.9 e 3.10, nas quais as cotas são em metros.



**Figura 3.8** - Representação 3D do suporte metálico

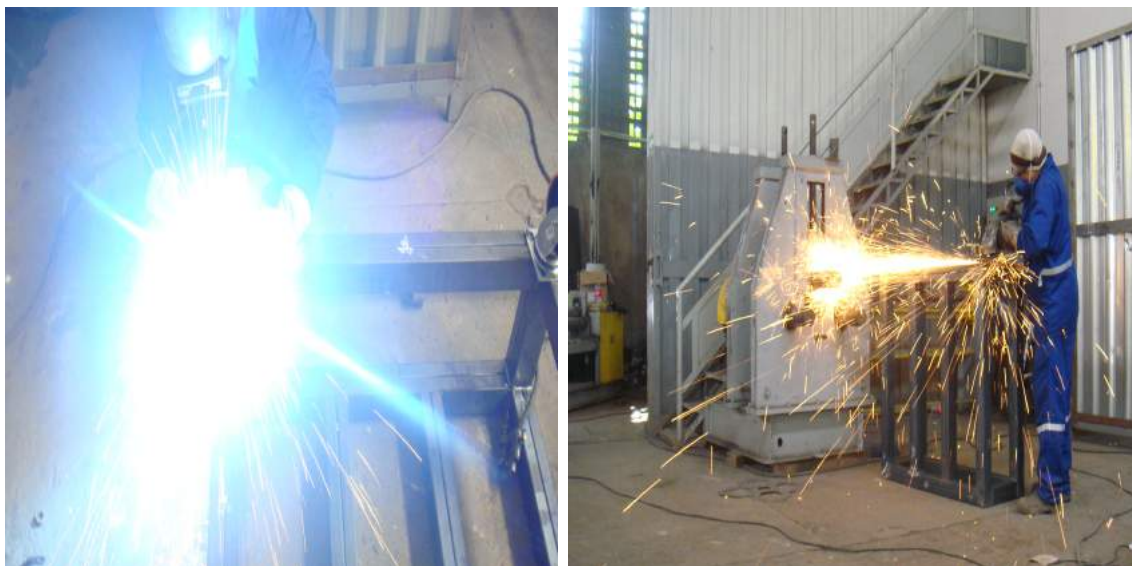


**Figura 3.9** – Planta com dimensões do suporte metálico (cotas em metros)



**Figura 3. 10** – Vista lateral com dimensões do suporte metálico (cotas em metros)

Toda a estrutura do suporte foi soldada e acabada com lixadeira (Figura 3.11). Além disso, ela foi pintada com tinta antioxidante da cor branca.



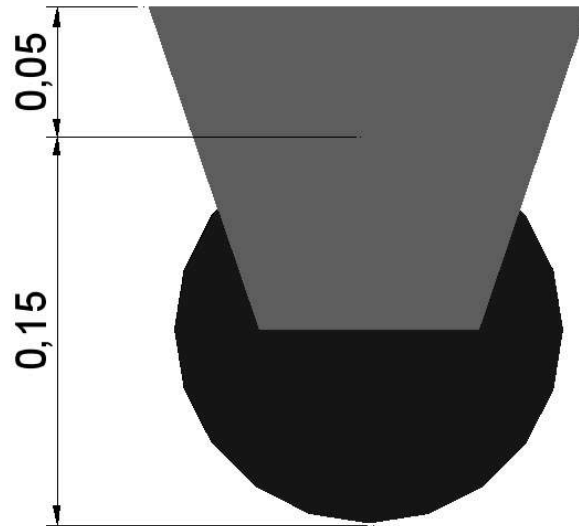
(a)

(b)

**Figura 3. 11** – Fabricação suporte metálico. (a)Solda dos perfis. (b) Acabamento com lixadeira.

Finalmente, tem-se os rodízios que conferem mobilidade ao protótipo. A carga a ser suportada por cada rodízio foi estimada somando-se as massas do material do experimento e da estrutura do modelo, e dividindo este resultado por 4, número de pés da estrutura. Ainda foi considerada uma folga para garantir a integridade dos rodízios, chegando-se a um valor de 500 kg por rodízio (item 3.3.1).

Para essa carga são necessários rodízios industriais, geralmente de ferro maciço. Então, procedeu-se com a aquisição dos mesmos em loja especializada. As dimensões do rodízio são vistas na Figura 3.12.



**Figura 3.12** -Detalhe do rodízio (cotas em metros)

Ressalta-se que, assim como todos os outros elementos da estrutura, as ligações entre a estrutura de suporte e os rodízios são soldadas (Figura 3.13). No processo de solda atentou-se para o resfriamento das borrachas que possibilitam a rotação dos rodízios, sempre adicionando água antes e depois da aplicação da solda.



**Figura 3.13** – Instalação dos rodízios

O suporte metálico completo, incluindo os rodízios, pode ser visto na Figura 3.14.



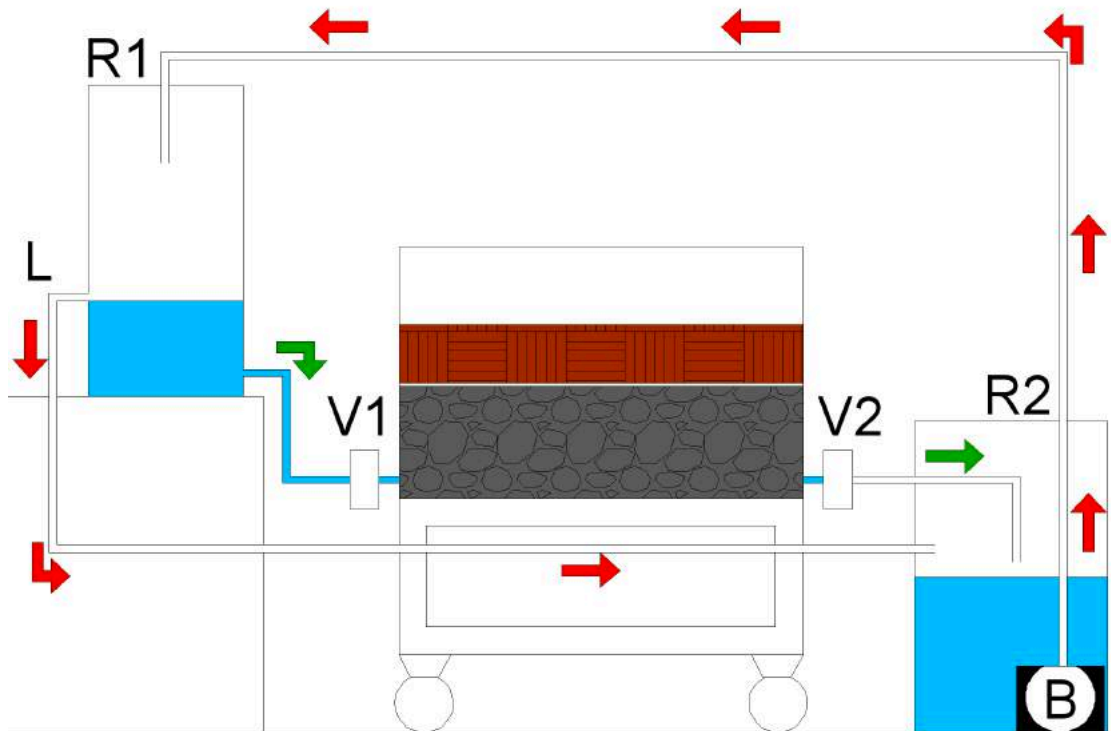
**Figura 3. 14 – Suporte metálico finalizado**

### **3.1.3. SISTEMA HIDRÁULICO**

O colchão drenante trabalhará saturado e sob carga constante durante os experimentos.

Para atender a necessidade de saturação do colchão, foi concebido um sistema hidráulico (Figura 3.15) que consiste em um reservatório elevado (R1) no qual estoca-se a água a ser introduzida no protótipo e um reservatório no nível do chão (R2) que capta a água recolhida pelo dreno. O controle do fluxo se dá por meio de dois registros, localizados antes do furo de entrada (V1) e após o furo de saída (V2). Existe, também, um sistema para manter a carga constante e recircular a água, minimizando o consumo de água durante a realização do experimento. Este sistema é composto por uma bomba submersível (B) de 750 W com vazão máxima de 13000 L/h e altura manométrica máxima de 9 metros de coluna d'água (mca), munida de um sensor de nível que controla o acionamento da mesma, e um ladrão (L) que mantém o nível constante em R1. Na Figura 3.15 tem-se um esquema do sistema hidráulico completo, onde as setas verdes indicam o fluxo que tem como objetivo saturar o colchão drenante e as setas vermelhas o fluxo de recirculação para manter a carga constante sem grandes consumos de água.





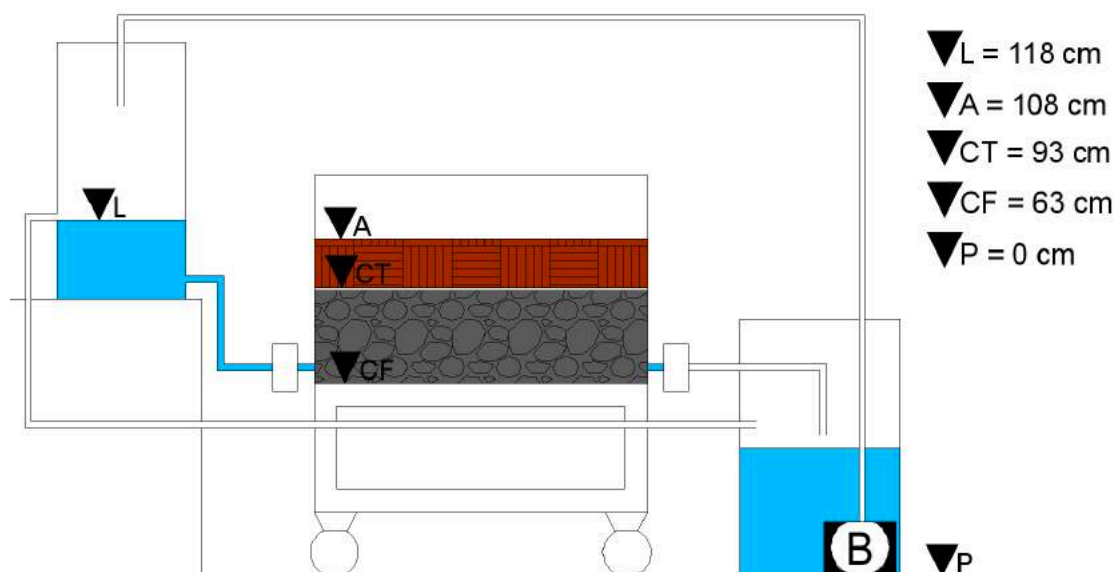
**Figura 3. 15** - Esquema do sistema hidráulico

Para a realização da parte do experimento que gasta mais água (caixa sem material, descrito no item 4.1.3), foi necessário a utilização de aproximadamente 330 L d'água. É um valor expressivo, mas baixo quando considerada a natureza dos ensaios e a quantidade de leituras registradas.

As cotas das partes do sistema foram pensadas para garantir uma carga de 0,55 mca, que seria a soma das alturas do colchão (30 cm), do aterro de argila (20 cm) e de uma lâmina d'água de 5 cm acima do aterro. Entretanto, ao longo da construção do protótipo, a camada de argila passou de 20 cm para 15 cm de espessura, logo tal carga seria a soma de 30 cm do colchão, 15 cm do aterro e 10 cm de lâmina d'água.

Como nota-se na Figura 3.16, o nível de referência foi o piso do laboratório (P). Na mesma imagem tem-se as cotas do fundo do colchão (CF), do topo do colchão (CT), do aterro de argila (A) e do ladrão (L), que é o nível da carga constante.





**Figura 3.16 - Cotas do sistema hidráulico**

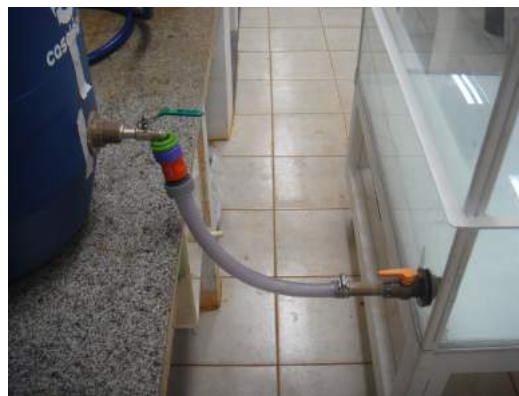
Os reservatórios são tambores plásticos, sendo que o superior tem capacidade de 80 L e o inferior de 120 L.

Os registros e a saída do ladrão são flanges com registro para caixas d'água. A vedação se dá por meio de um anel de borracha que fica prensado entre a parte plástica da flange e o vidro do protótipo (Figura 3.17 - a).

Todas as mangueiras têm diâmetro de  $\frac{3}{4}$ " (1,90 cm). Suas conexões com os registros V1 e V2 e com o ladrão foram feitas com braçadeiras metálicas, fixando-as em tubos de PVC de 10 cm de comprimento que foram lixados e colados nas flanges. Na conexão com o reservatório superior R1, a conexão da mangueira se dá por meio de um engate rápido, um adaptador e um registro de  $\frac{3}{4}$ ". A mangueira da bomba é fixada com uma braçadeira metálica diretamente na tubulação de recalque da bomba e entra no reservatório superior R1 por um furo na tampa de cobertura do mesmo. Esta mangueira contém ainda um registro na sua extremidade, possibilitando diminuir a vazão recalcada pela bomba para que esta não seja maior do que a capacidade do ladrão, mantendo, assim, a carga constante.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 3. 17** – (a) detalhe da flange com registro e conexão mangueira/flange. (b) ligação R1 a V1 com engate rápido e adaptador. (c) furo na tampa de cobertura de R1 para passagem da mangueira da bomba. (d) detalhe do registro na extremidade da mangueira da bomba. (e) R2 com a mangueira do ladrão (funcionando), a que vem do modelo (branca seca) e a da bomba (azul). Também é possível ver o sensor de nível da bomba. (f) detalhe do ladrão.

Outra parte do sistema hidráulico é um geotubo instalado verticalmente em relação ao colchão, indo do fundo ao topo da caixa de vidro. Ele fica espaçado em 15 cm da folha de vidro que contém o furo de saída e igualmente espaçado da folha de vidro oposta ao dreno.

Este geotubo tem como função facilitar o monitoramento do nível d'água e foi construído a partir de um tubo para drenagem com diâmetro de 10 cm envolto em um geotêxtil de polipropileno de 300 g/m<sup>2</sup> que evita o entrada de agregados e solos no tubo (Figura 3.18).

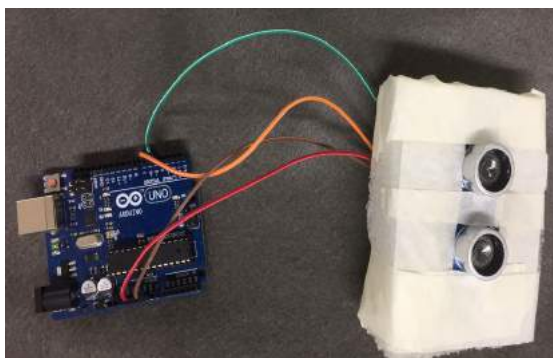


**Figura 3. 18** – Tubo de drenagem envolto com geotêxtil (esquerda) e sua configuração original (direita)

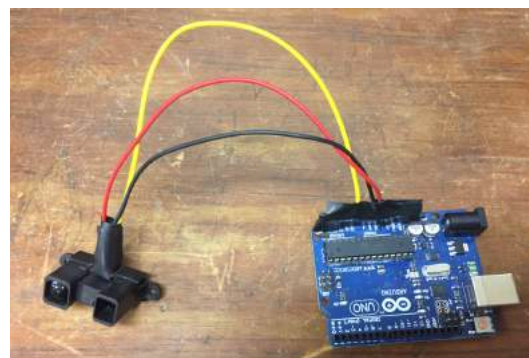
Foram realizadas várias tentativas de instalação de sensores para automatizar o acompanhamento da subida do nível d'água. Especificamente, iriam ser utilizados sensores de ultrassom ou infravermelhos analógicos, conectados a uma plataforma de prototipagem Arduíno que mandaria as informações para um programa de computador (Figura 3.19).



(a)



(b)

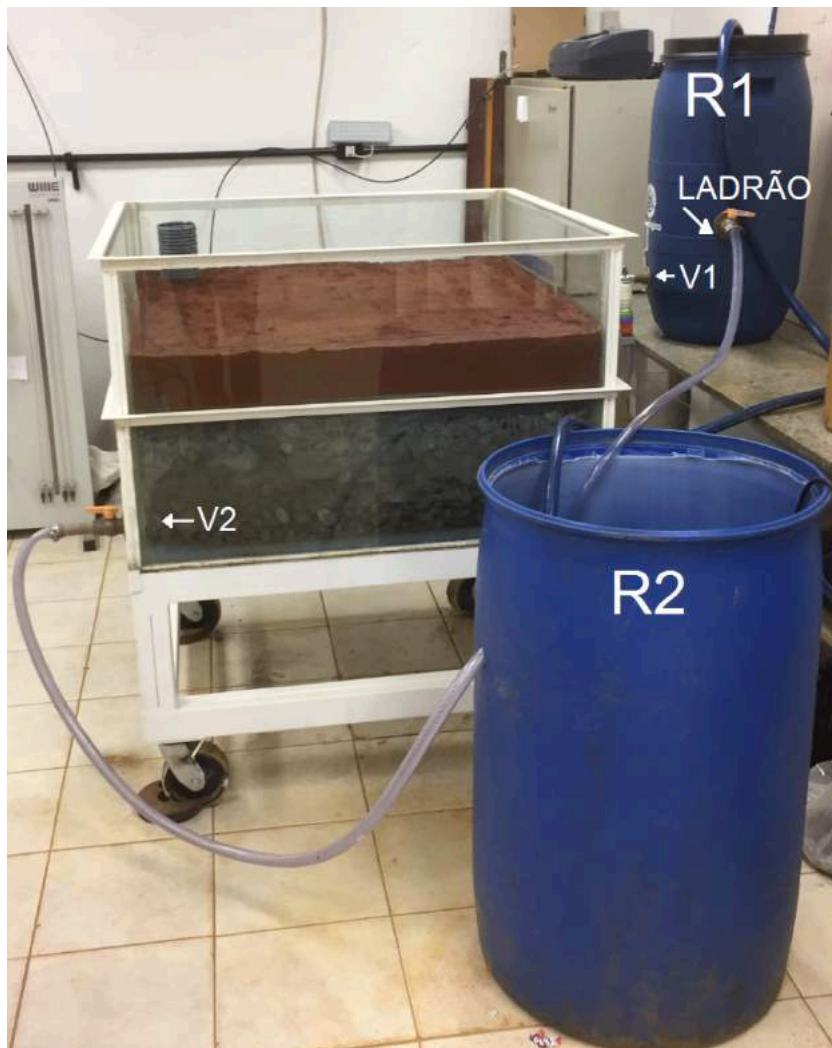


(c)

**Figura 3. 19** – Sensores para monitoramento do nível d’água. (a) detalhe do sensor instalado no geotubo. (b) sensor ultrassom conectado ao Arduíno. (c) sensor infravermelho analógico conectado ao Arduíno.

Infelizmente, os sensores não demonstraram a precisão necessária para fazer o referido acompanhamento, sendo substituídos por uma régua colada na lateral da caixa de vidro para observar visualmente a subida da linha d’água. De todo modo, a instalação do geotubo se justificou uma vez que, quando o nível d’água satura o colchão por completo e encontra a argila compactada, a subida de água dentro do tubo se dá de maneira veloz, indicando a saturação da camada em estudo.

A disposição do sistema hidráulico em relação ao recinto e à estrutura do protótipo pode ser observada na Figura 3.20.



**Figura 3. 20** – Configuração espacial do sistema hidráulico

## **3.2. MATERIAIS UTILIZADOS**

Neste subcapítulo explora-se os materiais que foram utilizados na pesquisa, sendo estes divididos em agregado siderúrgico (colchão drenante e dreno longitudinal), solo (aterro de argila) e geotêxteis. Para cada um será apresentada a caracterização ou especificação técnica do material e o modo como o mesmo foi adquirido.

### **3.2.1. COLCHÃO DRENANTE E DRENO LONGITUDINAL**

O IABr forneceu à UnB diversos tipos de agregados siderúrgicos advindos de diferentes processos de produção. Inicialmente, a escória foi britada e estocada a céu aberto, como processo de cura. Em seguida, o material foi transportado até a

Universidade de Brasília e estocado para ser objeto de pesquisa do Programa de Pós-Graduação de Geotecnia da UnB (PPG / UnB).

MARCHEZINI *et al* (2016) conduziram experimentos em diferentes amostras fornecidas pelo IABr, focando sobretudo nos requisitos de materiais filtrantes e drenantes estabelecidos pelo processo de Terzaghi. A Tabela 3.1 mostra as características das amostras iniciais, sendo que LD significa que a escória é advinda do processo de refino por conversor a oxigênio e AF designa as escórias de alto-forno.

**Tabela 3. 1-** Tamanho e processo de origem das amostras estudadas (MARCHEZINI *et al*, 2016)

Amostra	Tamanho (mm)	Tipo
A1	12 x 25	LD
A2	19 x 32	LD
A3	32 x 75	LD
B1	19 x 32	LD
B2	32 x 75	LD
B3	19 x 32	AF
B4	32 x 75	AF

Entre elas, somente a amostra B4 atendeu os critérios do coeficiente de uniformidade (Equação 2.7) e do coeficiente de curvatura (Equação 2.8), apresentando 3,19 e 1,62, respectivamente, como é possível observar na Tabela 3.2.

**Tabela 3. 2-** Coeficientes de uniformidade e curvatura das amostras (MARCHEZINI *et al*, 2016)

Amostra	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
A1	1,34	1,09
A2	1,49	1,14
A3	7,74	3,24
B1	1,70	1,17
B2	1,77	1,00
B3	17,13	8,28
B4	3,19	1,62

A partir dos resultados da Tabela 3.2, os mesmos pesquisadores fizeram combinações lineares entre as diferentes amostras a fim de obter faixas granulométricas que atendessem os critérios de Terzaghi. Como resultado, as faixas mostradas na Tabela 3.3 foram encontradas, sendo estas compostas por frações das amostras originais, indicadas na Tabela 3.4.



**Tabela 3. 3-** Faixas granulométricas das combinações lineares (MARCHEZINI *et al*, 2016)

Faixas	Peneiras (mm)									
	50	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	2,36	0,075	Fundo
C1	16,5	15,5	26,2	23,2	7,0	1,7	3,0	2,8	3,4	7,4x10 <sup>-1</sup>
C2	14,1	13,5	23,4	30,9	8,1	1,5	2,6	2,4	2,9	6,6x10 <sup>-1</sup>
C3	14,1	16,4	36,5	17,5	5,4	1,6	2,6	2,4	2,9	6,3x10 <sup>-1</sup>
C4	0	0	33,0	41,9	14,3	1,1	1,8	1,6	5,3	1,2
C5	4,3	3,1	31,7	37,6	12,8	1,0	1,7	1,5	5,2	1,1
C6	26,1	18,3	24,5	15,8	5,5	6,3x10 <sup>-1</sup>	1,4	1,6	5,3	8,1x10 <sup>-1</sup>
C7	8,7	6,1	31,7	33,8	11,5	8,7x10 <sup>-1</sup>	1,3	1,1	4,0	9,4x10 <sup>-1</sup>
C8	26,1	18,3	29,2	17,7	5,9	4,1x10 <sup>-1</sup>	4,5x10 <sup>-1</sup>	2,6x10 <sup>-1</sup>	1,2	4,9x10 <sup>-1</sup>
C9	30,4	21,4	24,4	12,0	4,2	4,9x10 <sup>-1</sup>	1,1	1,2	4,1	6,6x10 <sup>-1</sup>
C10	8,7	6,1	30,5	33,3	11,4	9,2x10 <sup>-1</sup>	1,6	1,5	5,0	1,0
C11	11,8	15,8	40,4	18,5	5,2	1,4	2,2	2,1	2,4	5,4x10 <sup>-1</sup>

**Tabela 3. 4-** Composição das combinações em relação às amostras originais (MARCHEZINI *et al*, 2016)

Faixa	Amostras originais em %						
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4
C1	20	10	70	-	-	-	-
C2	30	10	60	-	-	-	-
C3	10	30	60	-	-	-	-
C4	-	-	-	70	-	30	-
C5	-	-	-	60	10	30	-
C6	-	-	-	-	60	40	-
C7	-	-	-	60	20	20	-
C8	-	-	-	40	60	-	-
C9	-	-	-	-	70	30	-
C10	-	-	-	50	20	30	-
C11	10	40	50	-	-	-	-

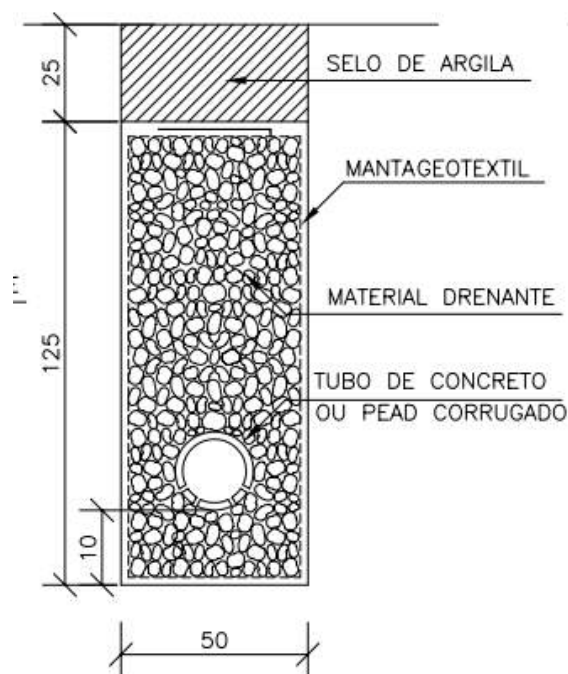
Até o momento, tem-se dados mais completos de ensaios de caracterização do material da combinação C1. Por este motivo, consideraremos as características de tal combinação para o desenvolvimento do colchão drenante, sendo que as mesmas encontram-se na Tabela 3.5 a seguir.

**Tabela 3. 5-** Características da amostra C1 (MARCHEZINI *et al*, 2016)

Amostra	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Massa específica dos grãos (kg/m <sup>3</sup> )
C1	3312	1,7	3370

Densidade real dos grãos	Amostra	Porosidade máxima $n_{m\acute{a}x}(\%)$	Peso específico dos grãos ( $kN/m^3$ )
3,4	C1	44	343,7

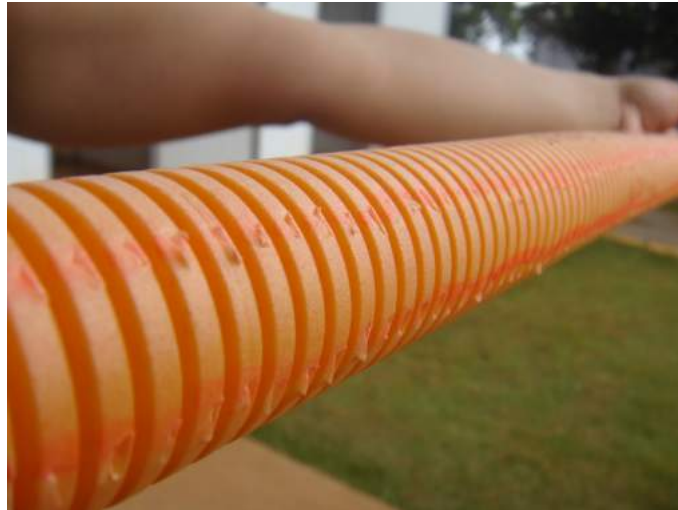
Como indicado no item 2.2.1 deste projeto, as águas interceptadas pelo colchão drenante devem ser removidas por drenos longitudinais. No protótipo construído, será seguido o Álbum de Projetos-Tipo de Estruturas de Drenagem do DNIT (2006) para a confecção do dreno longitudinal. Mais especificamente, será utilizado o DPS-07, mostrado na Figura 3.21, com as modificações necessárias para adequá-lo à configuração espacial do modelo.



**Figura 3. 21** - Corte do dreno longitudinal DPS-07 (cotas em centímetros)

Percebe-se que será necessário um tubo para realizar a drenagem. No projeto foi construído um tubo de drenagem a partir de um eletroduto flexível de  $\frac{3}{4}$ " (mesma bitola do furo de saída da caixa de vidro). Neste eletroduto, foram feitas ranhuras de modo manual, respeitando o que é preconizado no Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006). O resultado é observado na Figura 3.22. A manta geotêxtil indicada na Figura 3.21 será abordada no item 3.2.3 deste trabalho.





**Figura 3. 22** – Tubo do dreno longitudinal

A composição do material drenante do dreno longitudinal, por sua vez, é de 50% em massa de material com dimensões de 50 mm e 50% de material com dimensões de 25 mm, sendo que este material é da mesma origem do material do colchão drenante (faixa C1).

Conhecendo o volume do colchão e do dreno (item 3.3.1) e a massa específica da faixa C1, foi possível estabelecer um quantitativo de agregado siderúrgico, por peneira, necessário para a confecção do protótipo, que é mostrado na Tabela 3.6.

**Tabela 3. 6-** Quantitativo de agregado siderúrgico necessário e total peneirado por peneira

#	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	0.075
% colchão	16,5	15,5	26,2	23,2	7	1,7	3	2,8	3,4
% dreno	50		50						
massa (kg)	221,49	136,67	307,02	204,56	61,72	14,99	26,45	24,69	29,98
<b>total peneirado (kg)</b>	<b>565,22</b>	<b>356,93</b>	<b>366,97</b>	<b>267,16</b>	<b>62,4</b>	<b>15,45</b>	<b>32,47</b>	<b>31,69</b>	<b>59,86</b>

Portanto, a massa total necessária de agregados siderúrgicos é de 1027,57 kg. Nota-se, entretanto, que a massa peneirada é maior, mais precisamente 1758,15 kg. Isso se dá por conta da dificuldade de encontrar as granulometrias de 12,5 mm e 9,5 mm entre o material e, conseqüentemente, necessitou-se peneirar quantidades maiores de outras granulometrias para se ter a quantidade necessária das citadas.

O processo de obtenção do agregado siderúrgico pode ser observado na Figura 3.23 e descrito da seguinte forma:

- Coleta-se o material a ser peneirado em *big bags* de 1 tonelada nas quais eles estão estocados ao ar livre (Figura 3.23 – a);
- Se o material se encontrar molhado, secá-lo com auxílio de lâmpadas até que seja possível o peneiramento (Figura 3.23 – b);
- Utiliza-se o peneirador mecânico do INFRALAB e separe-se o material por tamanho de peneiras (Figura 3.23 – c);
- Esse material é armazenado em sacos de 40 kg ou 20 kg e devidamente identificado quanto a granulometria (Figura 3.23 – d);
- Uma vez alcançada a quantidade necessária, procede-se com a mistura proporcional do material, em sacos de 40 kg ou 20 kg, respeitando a mesma proporção da faixa granulométrica da estrutura (Figura 3.23 – e);
- Finalmente, estes sacos são identificados quanto à destinação final (colchão drenante ou dreno longitudinal) e transportados para o laboratório onde ocorrerão os ensaios (Figura 3.23 – f).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 3. 23** – (a) coleta do material nas *big bags*. (b) secagem do material com auxílio de lâmpadas (c) material no peneirador mecânico. (d) sacos identificados para armazenamento do material. (e) mistura proporcional do material. (f) transporte do material do INFRALAB ao Laboratório de Engenharia Ambiental no SG-12.

### 3.2.2. SOLO

O solo escolhido para simular um aterro sobre o colchão drenante foi, por motivo de conveniência, um solo característico da região de Brasília.

Este é uma argila com características apresentadas na Tabela 3.7. Os ensaios de caracterização foram feitos em 2016 pela empresa SOLOARTE, no escopo da obra do Trevo de Triagem Norte - Brasília/DF, executada pelo Consórcio VIA CONTERC, sendo que os valores aqui apresentados são a média dos resultados no mês de outubro. Geograficamente, esta argila é advinda do final do eixo rodoviário norte, área próxima ao Lago Paranoá.

**Tabela 3. 7-** Características do solo (Fonte: SOLOARTE, 2016)

Densidade do solo úmido (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade do solo seco (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade máxima Proctor (kg/m <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)	Umidade (%)
1883,73	1519,32	1538,89	25,35	24,56

### 3.2.3. GEOTÊXTEIS

Foram utilizados dois tipos de mantas geotêxteis neste projeto (Figura 3.24). Entre todas as camadas, incluindo a envelopamento do dreno longitudinal e do tubo geotubo descrito no item 3.1.3, utilizou-se uma manta de polipropileno de gramatura de 300 g/m<sup>2</sup>, visando minimizar o carreamento de finos de entre as diferentes camadas. O segundo tipo de manta geotêxtil utilizada era composta por poliéster e seu nome comercial é Bidim GT-07. Esta foi utilizada somente para forrar o vidro do fundo da caixa e protegê-lo contra impactos do agregado.



(a)



(b)

**Figura 3. 24 –** Geotêxteis utilizados. (a) Manta de polipropileno. (b) Manta de poliéster.

## 3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção define procedimentos experimentais que possibilitam que os objetivos do trabalho sejam cumpridos.

### 3.3.1. MONTAGEM DO MODELO

Uma vez que concluído o equipamento laboratorial e separados todos os materiais necessários, procede-se com a confecção da estrutura (Figura 3.25) seguindo os seguintes passos:

- Primeiramente, posiciona-se o geotêxtil que forra o fundo da caixa. Em seguida coloca-se uma placa de madeira, confeccionada a partir de uma forma plastificada para concretagem, com dimensões de 1,02 x 0,65 cm, para servir de separação provisória entre colchão drenante e dreno longitudinal, já com o geotêxtil que envelopa o dreno preparado. Por fim, tem-se a colocação do geotubo para acompanhamento do nível d'água e do tubo de drenagem do dreno longitudinal (Figura 3.25 – a);
- Insere-se, ao mesmo tempo, o material do colchão drenante e do dreno longitudinal, puxando para cima, gradualmente, a placa divisória. Quando atinge-se a altura de 30 cm, a placa é retirada totalmente, cobre-se o dreno com o restante da manta que estava preparada na placa e, por fim, cobre-se toda a área em planta do modelo com o geotêxtil de polipropileno (Figura 3.25 – b, c, d);
- Prossegue-se com a confecção do aterro de argila sobre o colchão (Figura 3.25 – e, f). Para tal, é adicionado o solo em camadas de pequena espessura (2 cm) e compacta-se o mesmo com um pilão artesanal feito com um caibro e duas chapas de madeira compensada, observando a umidade que resulta em um bom adensamento. Não foi usado um pilão tradicional pois estes acarretariam um grande impacto sobre os vidros da estrutura. Repete-se este procedimento até o aterro estar com 15 cm de altura (foram necessárias 10 camadas de aterro);
- Confere-se se o sistema hidráulico está conforme indicado no 3.1.3 e, caso positivo, conecta-se o engate rápido que liga R1 a V1.





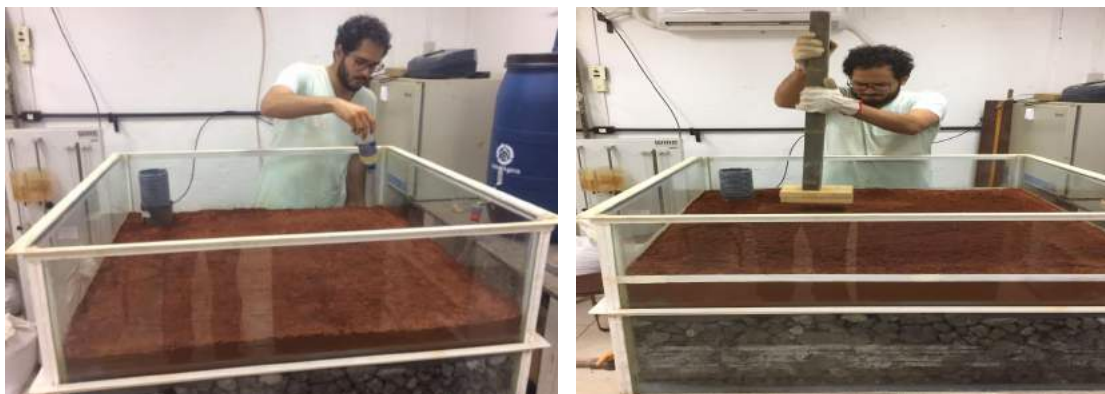
(a)

(b)



(c)

(d)

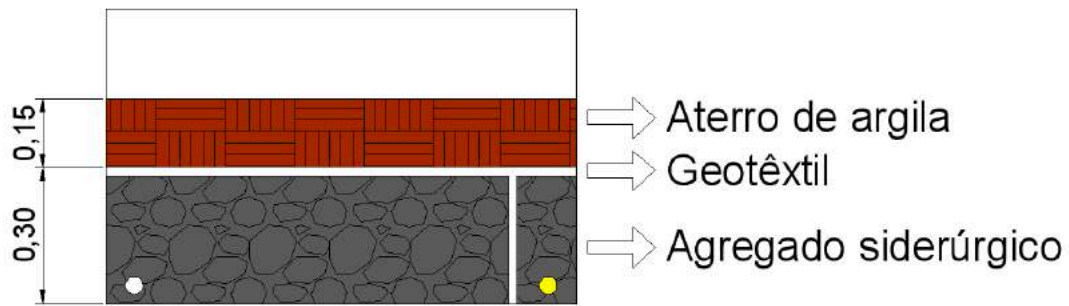


(e)

(f)

**Figura 3. 25 – Montagem do modelo.** (a) colocação dos elementos iniciais. (b) adição simultânea do agregado do colchão e dreno e retirada gradual da placa divisória. (c) envelopagem do dreno longitudinal com manta geotêxtil. (d) cobertura da camada com manta geotêxtil. (e) umedecimento da argila para melhor adensamento e interação com as próximas camadas de aterro. (f) compactação manual do aterro de argila.

Seguindo estes passos chega-se a configuração representada na Figura 3.26.



**Figura 3. 26** - Esquema do modelo (cotas em centímetros)

Com essa configuração padrão, que é a mais desfavorável em termos de peso suportado pelo equipamento laboratorial, pode-se estimar a massa total contida na caixa. Isso é feito multiplicando o volume das camadas pela massa específica de cada material constituinte, atentando para o fato de que o colchão trabalhará saturado, ou seja, todos os vazios (porosidade máxima de 44% segundo Tabela 3.5) estarão preenchidos com água.

$$V_{argila} = 0,15 \, m^3$$

$$V_{agreg} = 0,30 \, m^3$$

$$V_{\acute{a}gua} = (0,44 \cdot 0,30) = 0,132 \, m^3$$

$$\rho_{solo} = 1883,73 \, kg/m^3$$

$$\rho_{agreg} = 3312 \, kg/m^3$$

$$\rho_{\acute{a}gua} = 1000 \, kg/m^3$$

$$m_{solo} = 0,15 \cdot 1883,73 = 282,56 \, kg$$

$$m_{agreg} = 0,30 \cdot 3312 = 993,60 \, kg$$

$$m_{\acute{a}gua} = 0,132 \cdot 1000 = 132 \, kg$$

$$m_{TOTAL} = 282,56 + 993,60 + 132 = 1408,16 \, kg$$

Este valor foi arredondado para 1600 kg, superestimando a massa dos vidros e da pequena estrutura metálica que acomoda os mesmos (200 kg). Portanto, 1600 kg foi considerado como a massa a ser suportada pela estrutura metálica de suporte.

Para os rodízios, acrescentou-se a essa valor a massa da estrutura metálica de suporte. Considerando que serão utilizados 11,40 m do perfil caixa escolhido, o qual a massa é de 5,40 kg/m, tem-se que a massa da estrutura metálica de suporte é de 61,56 kg.

Logo, temos 1670,10 kg divididos por quatro rodízios. Isto implica em 415,39 kg por rodízio. Considerando ainda um coeficiente de segurança de 1,2, temos que cada rodízio suportará aproximadamente 500 kg.

### **3.3.2. OPERAÇÃO DO PROTÓTIPO**

A operação do protótipo consiste majoritariamente na operação dos registros V1 e V2. Tanto para a análise 1D do fluxo quanto para a análise 2D, tem-se os mesmos procedimentos experimentais. A seguir, apresenta-se a rotina seguida:

- Com V1 e V2 fechados, liga-se a bomba e estabelece-se o equilíbrio entre R1 e R2 (ladrão funcionando em condição não afogada). Logo, tem-se uma carga constante;
- Abre-se V1 e acompanha-se a subida do nível d'água. Como agora existe fluxo de água para dentro da caixa de vidro, é necessário aumentar a abertura do registro que controla a vazão da bomba para manter a carga constante;
- Uma vez saturado o colchão, abre-se V2 e coleta-se, em um recipiente graduado, 10 L de água, marcando o tempo em um cronômetro. Ressalta-se que a coleta deve se dar no nível do piso do laboratório para garantir a carga hidráulica que foi utilizada nos cálculos;
- Repete-se tais leituras até se ter a quantidade desejada de dados, sempre atentando para o funcionamento do ladrão (carga constante) e a saturação do colchão drenante.





(a)



(b)

**Figura 3. 27** – Operação do protótipo. (a) ladrão funcionando em condição não afogada. (b) recipiente de coleta posicionado no nível do piso do laboratório.

## 4. RESULTADOS

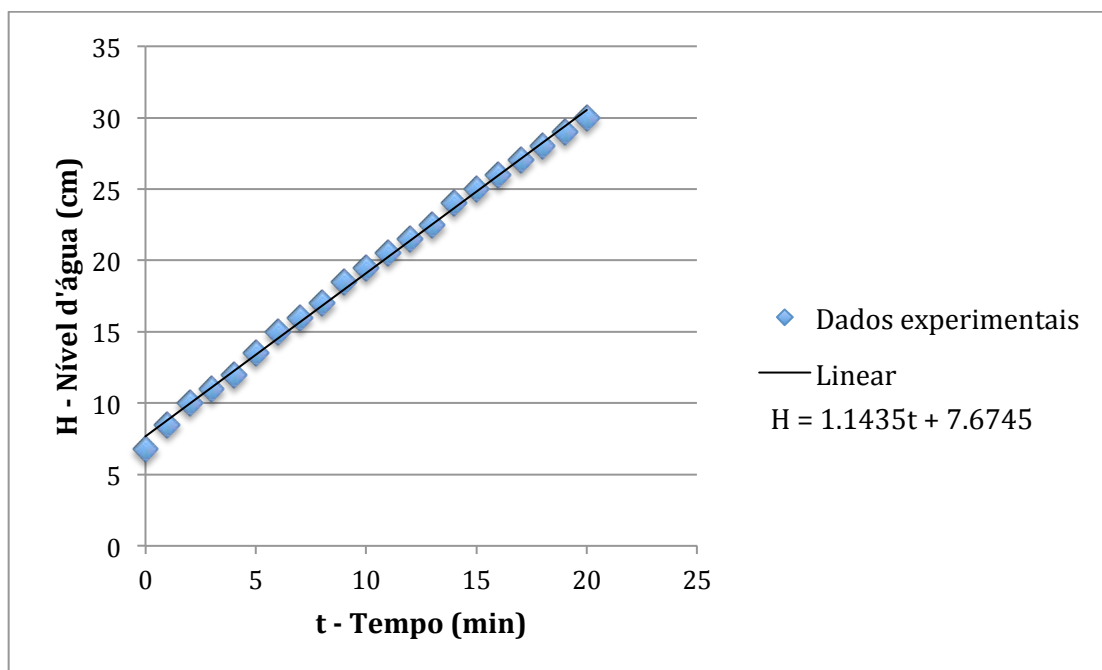
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos experimentos descritos no Capítulo 3. Além dos valores encontrados que possibilitaram as análises em 1D e 2D do fluxo, considerou-se como resultados o acompanhamento da subida do nível d'água, o aspecto da água antes e depois de passar pelo material e a observação de ocorrência de um material fino que ficou aderido aos vidros.

### 4.1.1. SIMULAÇÃO DE SUBIDA DO LENÇOL FREÁTICO

Visando coletar dados para trabalhos futuros e, principalmente, acompanhar a simulação em laboratório de um evento ocorrente em campo (a subida do nível freático), registrou-se a altura da linha d'água a cada segundo e obteve-se os que podem ser vistos na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

**Tabela 4.1-** Subida do nível d'água ao longo do tempo

<b>Tempo (min)</b>	<b>Altura da linha d'água (cm)</b>
0	6.8
1	8.5
2	10
3	11
4	12
5	13.5
6	15
7	16
8	17
9	18.5
10	19.5
11	20.5
12	21.5
13	22.5
14	24
15	25
16	26
17	27
18	28
19	29
20	30



**Figura 4. 1** - Gráfico da relação entre o nível da linha d'água e o tempo decorrido desde o início do experimento

Percebe-se que a subida do nível d'água acontece de maneira aproximadamente linear. O ajuste feito (mostrado na Figura 4.1 pela linha “Linear”) indica que a cada minuto a linha freática sobe 1,14 cm. Também é possível observar que leva-se 20 minutos para o colchão drenante estar saturado.

#### 4.1.2. ANÁLISE VISUAL QUALITATIVA

Os resultados apresentados neste item baseiam-se em observações ocorridas durante o experimento. Logo, como não foi possível realizar medições ou análises mais profundas, optou-se por avaliar qualitativamente os resultados em questão. Tais observações são relativas à ocorrência de um material fino que ficou aderido em todos os vidros da caixa e ao aspecto visual da água antes e depois da passagem pelo material estudado.

Notou-se que, a cada simulação de subida do lençol, a quantidade de material fino aderido às paredes de vidro aumentava. Também foi observado que este material é hidrossolúvel dado que, toda vez que o nível d'água subia, ele desaparecia completamente, voltando a ficar aderido aos vidros quando o lençol descia. Na Figura 4.2 tem-se um comparativo entre a primeira vez em que foi observada a ocorrência

deste material (primeira simulação) e após a última simulação realizada, ou seja, depois de 8 simulações. Na Figura 4.3, observa-se a solubilidade do material em água.



**Figura 4.2** – Ocorrência de material fino aderido às paredes do protótipo. (a) após a primeira simulação. (b) após a última simulação

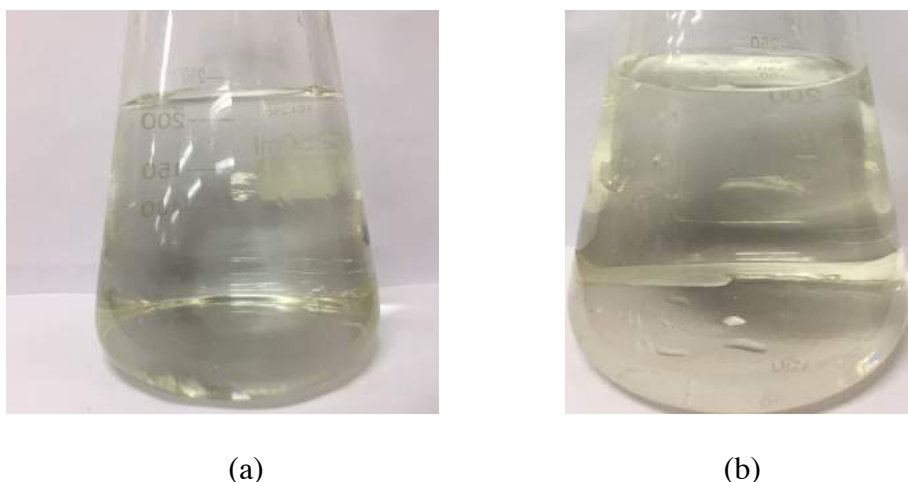


**Figura 4.3** - Solubilidade do material fino em água

Não é possível afirmar que este fino observado é o carbonato de cálcio (turfa) que, conhecidamente, pode causar a colmatção dos drenos. Entretanto, a ocorrência deste fenômeno dentro do dreno longitudinal (composto unicamente de material com

grandes dimensões e envelopado com manta geotêxtil) merece ser estudada mais a fundo em futuros trabalhos, visto que tal material pode ter potencial para entupir o sistema drenante.

O aspecto visual da água, antes e depois de sua passagem pelo protótipo, também foi observado e é mostrado na Figura 4.4.

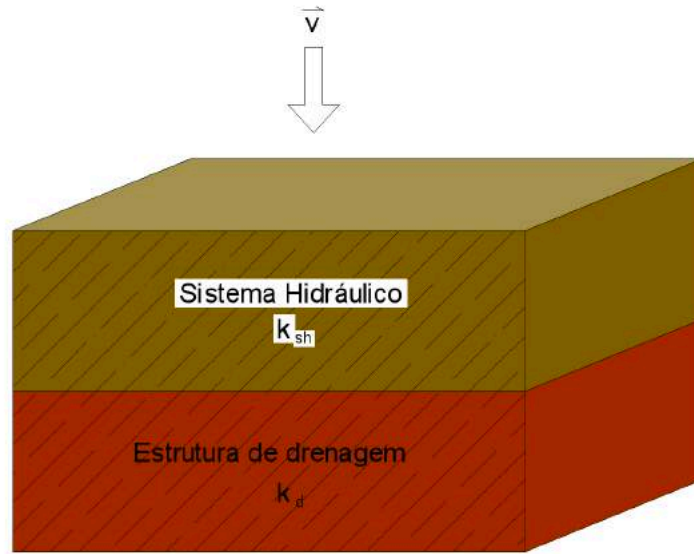


**Figura 4.4** – (a) aspecto visual da água antes de passar pelo protótipo. (b) aspecto visual da água após passar pelo protótipo

Visualmente, pode-se afirmar que a água manteve suas propriedades, não sendo possível detectar material carregado ou mudança de cor ou odor. Porém, considerando o impacto ambiental que pode ser causado pela utilização das escórias em estruturas de drenagem, este é outro ponto a ser aprofundado em trabalhos futuros, conduzindo ensaios que analisam quimicamente a água que passa pelo protótipo.

#### **4.1.3. ANÁLISE 1D DO FLUXO ESTACIONÁRIO**

Usando a teoria da condutividade hidráulica equivalente em fluxo vertical (item 2.3.2), fez-se uma análise em uma dimensão do fluxo dentro do protótipo. Para tal, partiu-se da Equação 2.26 e considerou-se que o conjunto experimental como um todo era composto por duas parcelas: o sistema hidráulico e a estrutura de drenagem em si, no caso o colchão drenante e o dreno longitudinal, ambos formados por agregado siderúrgico. Estas partes foram consideradas como duas estratificações de um solo (Figura 4.5).



**Figura 4.5** – Representação do modelo proposto

É importante frisar que cada uma dessas estratificações tem uma condutividade hidráulica própria ( $k_{sh}$  para o sistema hidráulico e  $k_d$  para a estrutura de drenagem). Assim, a Equação 2.26 pode ser escrita como:

$$k_{eq} = \frac{H}{\frac{H_{sh}}{k_{sh}} + \frac{H_d}{k_d}} \quad (4.1)$$

Portanto, quando seguidos os passos descritos no item 3.3.2 com material dentro da caixa de vidro, tem-se uma medida de vazão que diz respeito ao conjunto total (sistema hidráulico e estrutura de drenagem). A partir deste valor encontra-se o  $k_{eq}$  por meio da lei de Darcy (Equação 2.19).

O mesmo procedimento experimental (item 3.3.2) tem que ser feito com a caixa sem material (Figura 4.6), encontrando assim a vazão relativa ao escoamento através, unicamente, do sistema hidráulico. Consequentemente, encontra-se o valor para o  $k_{sh}$  aplicando-se a lei de Darcy.



**Figura 4.6** – Ensaio sem material

A partir disto, utilizando-se a Equação 4.1, é possível encontrar um valor para a condutividade hidráulica da estrutura de drenagem ( $k_d$ ). Considerou-se a mesma carga hidráulica ( $h$ ) para todos os casos, uma vez que esta se mantém constante em 1,18 m. O comprimento do sistema hidráulico ( $H_{sh}$ ) é de 2,91 m (soma dos comprimentos das conexões e das mangueiras de entrada e saída), enquanto que o comprimento da estrutura de drenagem ( $H_d$ ) foi considerado igual ao comprimento da diagonal do quadrado de 1,02 x 1,02 m, ou seja, 1,44 m. Logo, o comprimento total ( $H$ ) é a soma destes últimos, ou seja, 4,35m.

Os tempos coletados para cálculo da vazão com a caixa cheia de material e vazia estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4.2 e 4.3.

**Tabela 4.2-** Tempos para cálculo de vazão (caixa com a estrutura drenante)

<b>Leitura</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Tempo (s)</b>	21.37	21.99	19.00	20.48	21.79
<b>Média (s)</b>	20.93				

**Tabela 4.3-** Tempos para cálculo de vazão (caixa vazia)

<b>Leitura</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Tempo (s)</b>	18.30	18.40	18.08	17.40	18.50
<b>Média (s)</b>	18.14				

Lembrando que o volume coletado foi de 10 L, tem-se as vazões indicadas na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4- Vazões**

	<b>Com material</b>	<b>Sem material</b>
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	4,8 . 10 <sup>-4</sup>	5,5 . 10 <sup>-4</sup>

A partir destes valores, utiliza-se a lei de Darcy (na Equação 4.2 escrita isolando-se o  $k$ ) para encontrar os valores de condutividade hidráulica, apresentados na Tabela 4.5. O diâmetro interno do tubo de saída, necessário para os cálculos, é de 1,8 mm.

$$k = \frac{Q}{\frac{h}{L} \frac{\pi d^2}{4}} \quad (4.2)$$

**Tabela 4.5 – Condutividade hidráulica**

	<b>k<sub>eq</sub></b>	<b>k<sub>sh</sub></b>
<b>Condutividade (m/s)</b>	4,8 . 10 <sup>-4</sup>	5,5 . 10 <sup>-4</sup>

Com esses resultados, usando a Equação 4.1 escrita como se mostra na Equação 4.3, é possível calcular a condutividade hidráulica da estrutura de drenagem ( $k_d$ ), valor este mostrado na Tabela 4.6.

$$k_d = \frac{H_d}{\frac{H}{k_{eq}} - \frac{H_c}{k_c}} \quad (4.3)$$

**Tabela 4.6 – Condutividade hidráulica (análise 1D)**

	<b>k<sub>d</sub></b>
<b>Condutividade (m/s)</b>	17,22

Por esta análise, nota-se que o resultado encontrado é grande, sendo maior do que valores típicos de condutividade hidráulica para agregados graúdos, que variam entre 1 e 10<sup>-2</sup> m/s (WHITLOW, 1995).

Com este resultado, portanto, poderia se afirmar que o material é muito permeável. No entanto, devido à natureza do problema ser de um fluxo que acontece em mais do



que uma dimensão e ao valor encontrado nessa análise ser incomumente alto, optou-se por considerar mais relevantes os resultados encontrados por meio da análise 2D do fluxo estacionário.

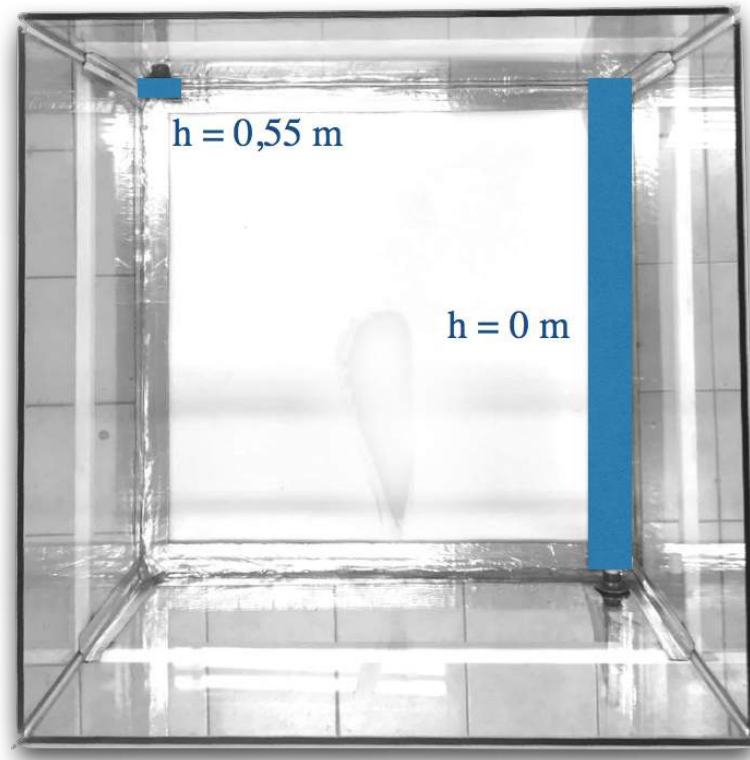
#### **4.1.4. ANÁLISE 2D DO FLUXO ESTACIONÁRIO**

A forma geométrica do tanque construído determina que a natureza do fenômeno de fluxo saturado seja determinada com mais exatidão por, pelo menos, duas dimensões. Assim, faz-se necessário recorrer às Diferenças Finitas para descrever o experimento, tal como descrito previamente (item 2.4).

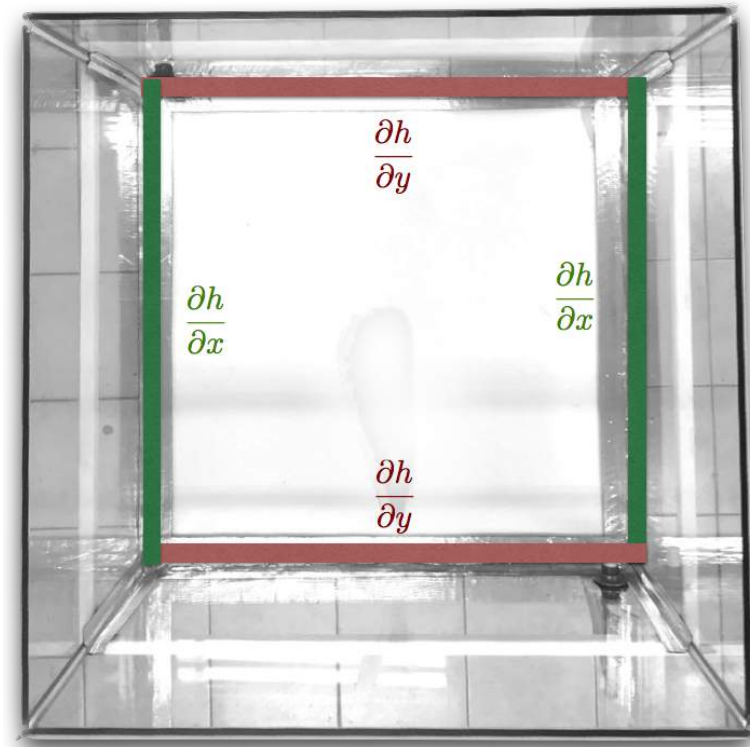
Para determinar o fenômeno de fluxo matematicamente, deve-se estabelecer as condições de contorno do tanque. Uma vez que a experimentação e a simulação são estacionárias, dispensa-se a formulação de uma condição inicial.

As regiões em azul da Figura 4.7 indicam uma condição de Dirichlet. A tubulação de entrada comunica a carga do reservatório superior diretamente para o tanque da simulação. Tomando as alturas de chegada e saída da água como referência, tem-se que a carga hidráulica desse primeiro ponto vale 0,55 m. Já a tubulação do dreno instalado no tanque, como não faz parte do agregado, pertence à condição de contorno. A tubulação do dreno está ligada com o registro de saída, que permite com que a água escoe livremente para o reservatório inferior. Dessa forma, tal tubulação constitui uma condição de Dirichlet com valor nulo, uma vez que nesse ponto a carga hidráulica é constante e igual a zero.

A Figura 4.8 mostra as outras condições de contorno, descritas por Neumann. Mais especificamente, o vidro do tanque é descrito como uma fronteira impermeável em toda sua extensão.



**Figura 4.7** – Condição de Dirichlet



**Figura 4.8** – Condição de Neumann

Sem dificuldades, pode-se implementar computacionalmente o código em Diferenças Finitas para o fluxo no Excel e visualizá-lo no software Mathematica. Na discretização adotou-se a distância de cada nó como 2 cm, ou seja  $\Delta x = \Delta y = 0,02$  m.

Deve-se notar que, pelo fato do fenômeno ser estacionário, a malha do domínio foi iterada até não haver variações relevantes em seus valores. Foi considerado, para a primeira iteração, valor nulo para todas os nós do domínio. Dessa forma é possível determinar tanto a carga hidráulica quanto as velocidade ao longo do domínio tratado.

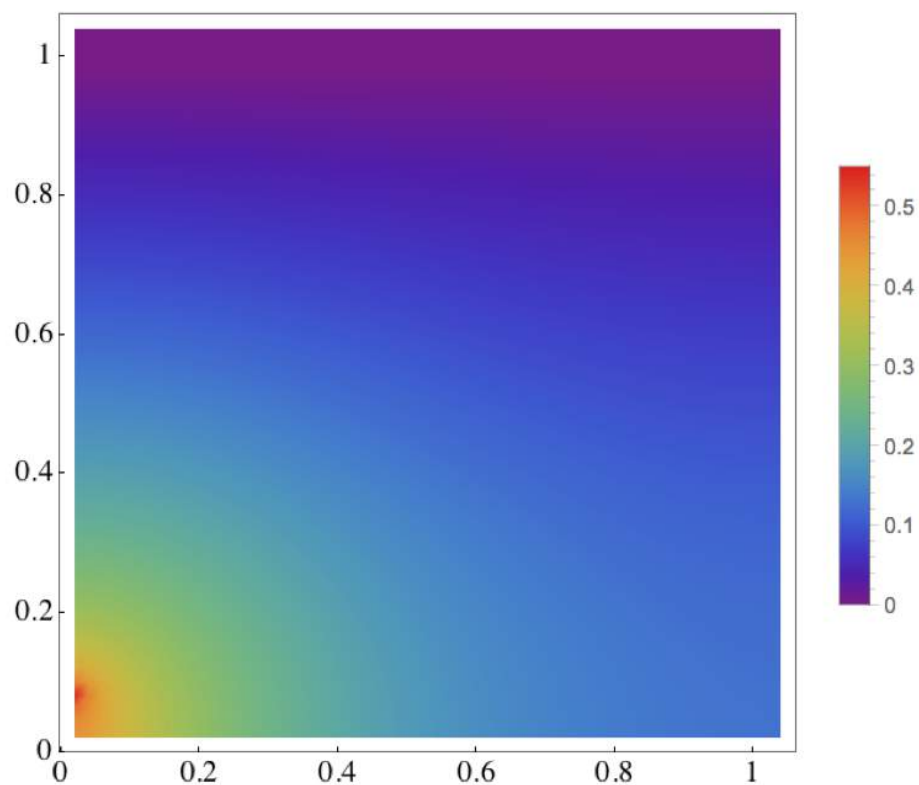
Para encontrar a condutividade hidráulica, considerou-se o meio como homogêneo e isotrópico e fez-se diversas simulações. Cada simulação tinha o propósito de calcular, além da carga hidráulica e da velocidade, a vazão pela tubulação do dreno. A vazão pela tubulação do dreno foi calculada multiplicando o vetor velocidade pela área de cada nó. Para cada condutividade hidráulica escolhida na simulação, encontra-se uma vazão determinada. Para saber qual é a condutividade hidráulica correta, variou-se seu valor até encontrar a vazão medida experimentalmente, como descrito na Tabela (). Assim, encontrou-se o valor mostrado na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7** – Condutividade hidráulica (análise 2D)

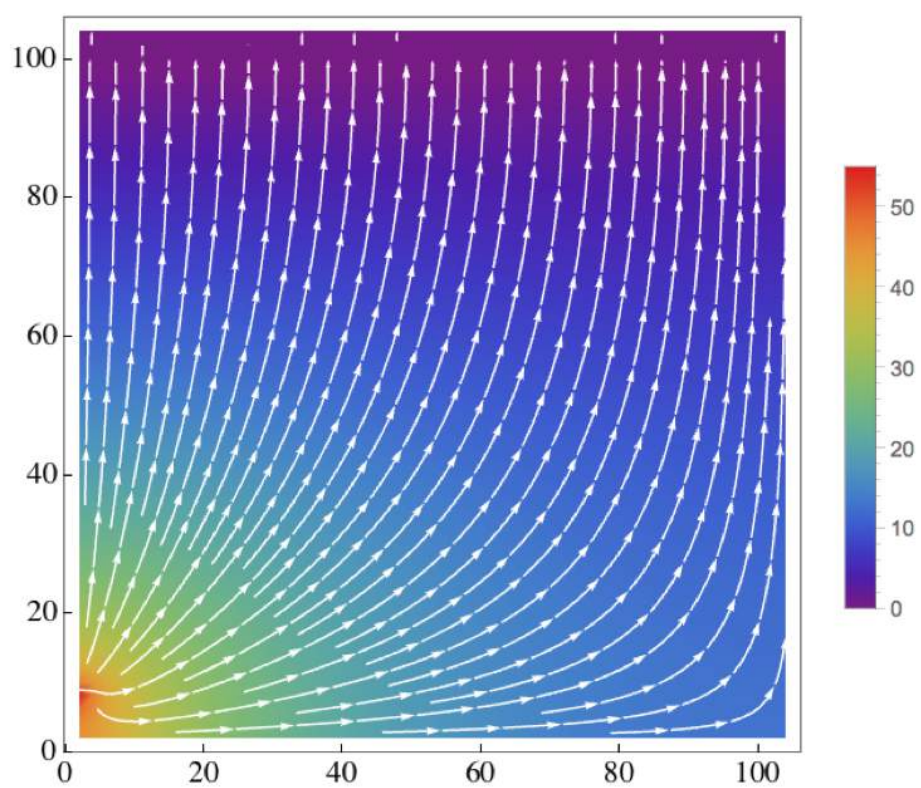
	$k_d$
<b>Condutividade (m/s)</b>	$1,03 \cdot 10^{-1}$

A Figura 4.9 representa em escalas de cores a carga hidráulica em m.

Para se ter uma melhor ideia de como a carga hidráulica e sua variação se correlacionam com o fluxo, pode-se representar a direção do fluxo tal como é proposto na Figura 4.10.

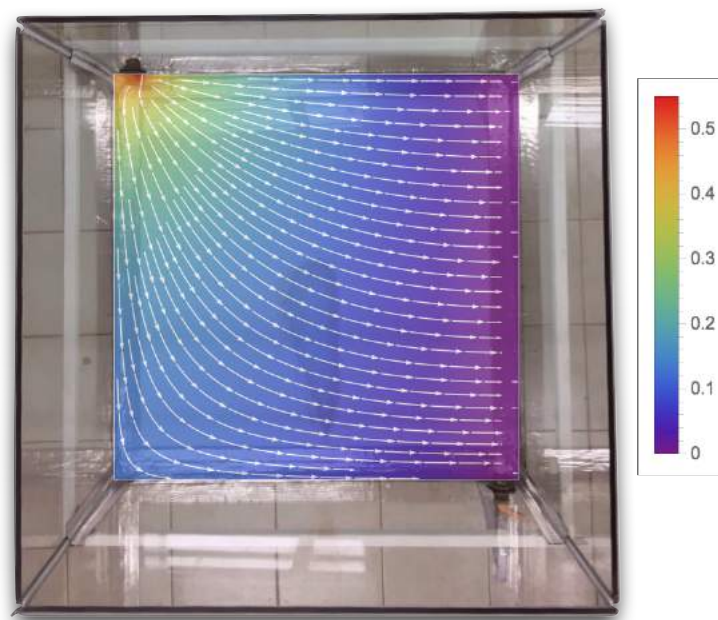


**Figura 4.9** – Carga hidráulica



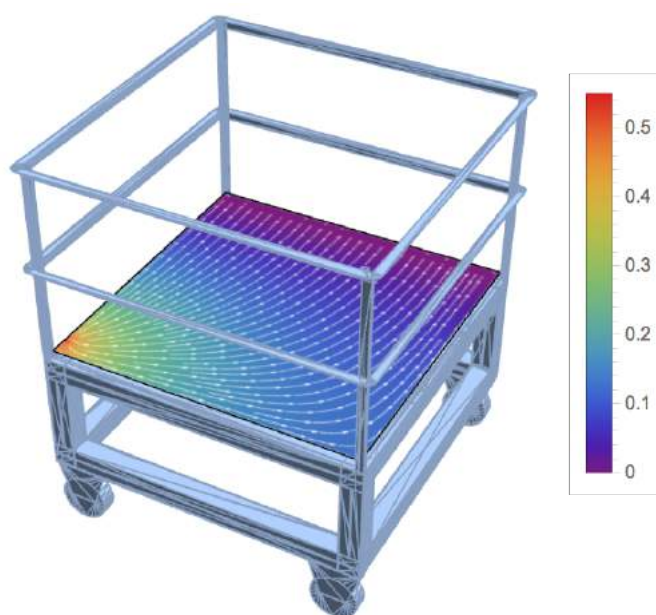
**Figura 4.10** – Carga hidráulica (escala de cores) e fluxo (vetores)

Para se ter uma melhor compreensão de como associar a carga hidráulica e a direção de fluxo no tanque de experimentação pode-se sobrepor a foto do tanque à simulação, tal como mostrado na Figura 4.11.



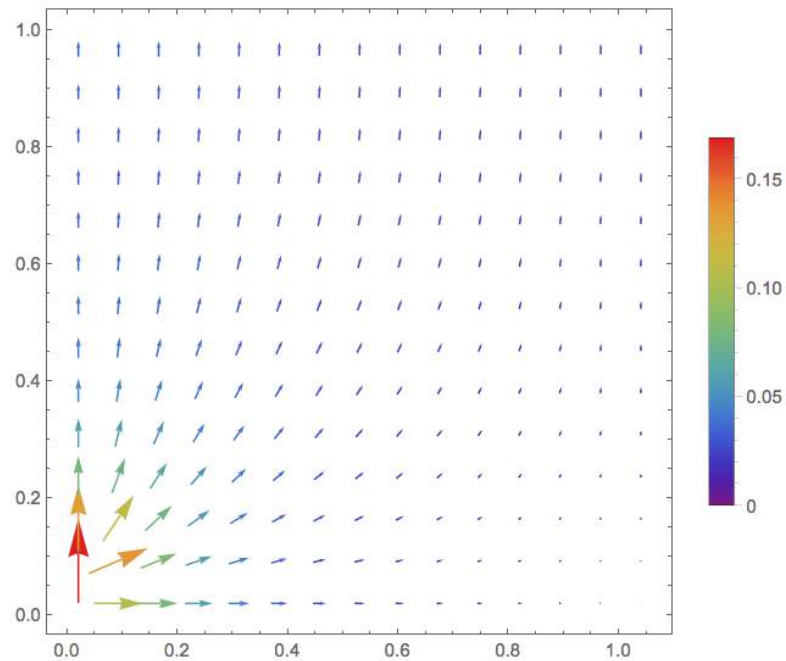
**Figura 4.11** – Carga hidráulica e fluxo (vista em planta)

Ou ainda, a sobreposição da simulação ao modelo 3D do tanque, tal como mostrado na Figura 4.12.



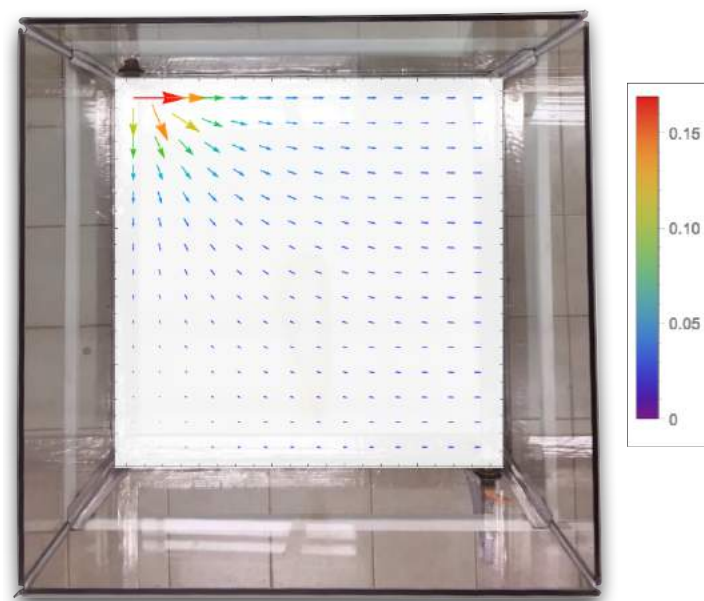
**Figura 4.12** – Carga hidráulica e fluxo (modelo 3D)

Não apenas a direção do fluxo pode ser mostrada, mas também a magnitude das velocidades podem ser descritas. Semelhantemente, a Figura 4.13 mostra os vetores de velocidade em m/s, em uma escala de cor e tamanho.



**Figura 4.13** – Vetores de velocidade

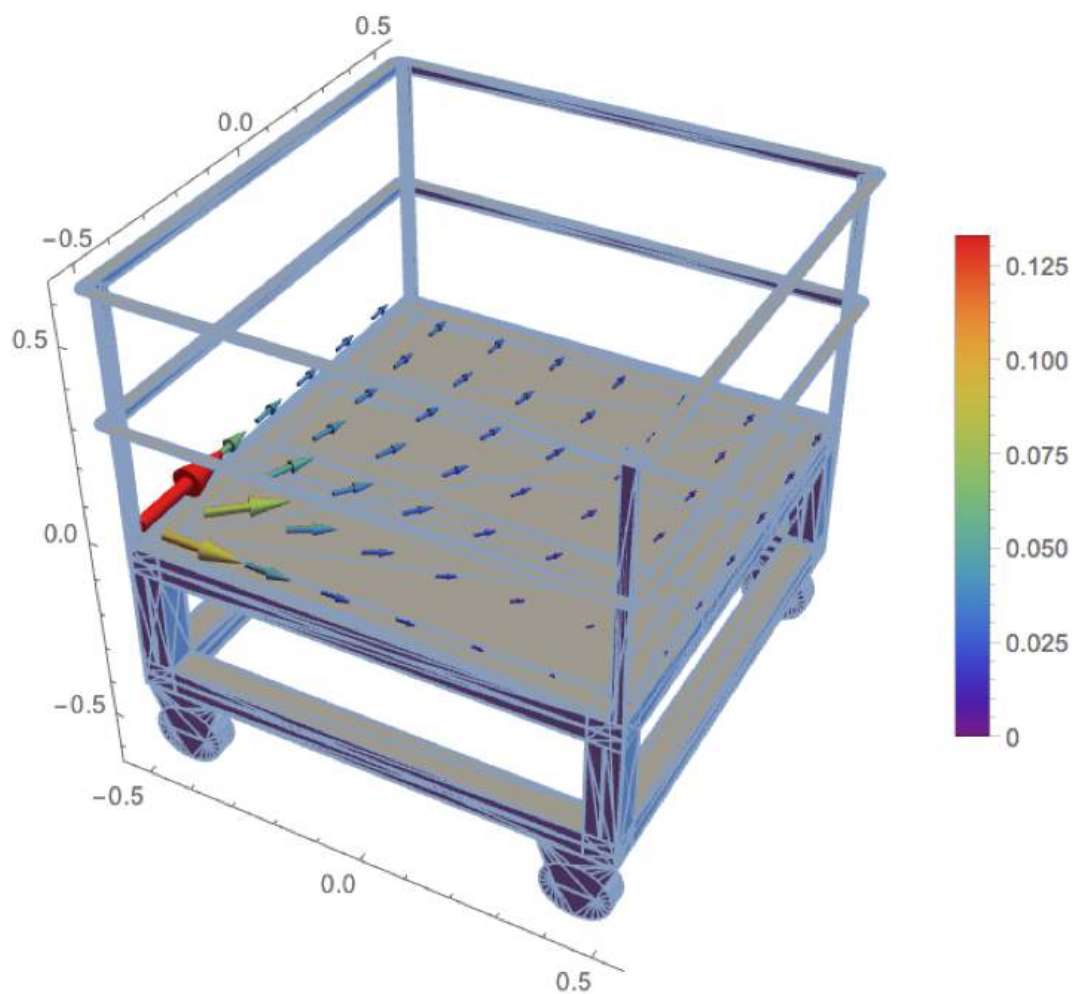
Para melhor compreensão, pode-se representar os vetores de velocidade na foto do tanque de ensaio, tal como na Figura 4.14.



**Figura 4.14** – Vetores de velocidade (vista em planta)



Por fim, pode-se representar a velocidade de fluxo no modelo em CAD, como na Figura 4.15.



**Figura 4.15** – Vetores de velocidade (modelo 3D)

## 5. CONCLUSÃO

Por conta da natureza do fluxo que ocorre dentro do protótipo, considerou-se que o resultado obtido através da análise 2D para a condutividade hidráulica do material é o mais plausível. Este valor foi  $k = 1,03 \cdot 10^{-1}$  m/s e está enquadrado na faixa de valores típicos para agregados graúdos, materiais estes que têm seu uso já consagrado na confecção de colchões drenantes. Já a análise 1D resultou em um  $k = 17,22$  m/s, valor considerado muito alto. Para o ajuste deste resultado, sugere-se que, em futuros trabalhos, sejam levadas em conta todas as perdas de carga que ocorrem quando tem-se condutos forçados ligados em série.

Outra observação importante advinda do estudo foi a ocorrência de um material fino que ficou aderido aos vidros do protótipo e aumentava em quantidade a cada simulação de subido do lençol freático. Não há como afirmar que tal material era de fato a turfa, que conhecidamente causa a colmatagem dos drenos, uma vez que não foram feitas análises específicas no material. Além disso, observou-se que a água, antes e depois de sua passagem pelo protótipo, apresenta o mesmo aspecto visual. Tanto para o caso do fino quanto para o caso da água, sugere-se que, em trabalhos futuros, execute-se uma análise química destes materiais.

Portanto, conclui-se que é possível obter uma faixa granulométrica que atenda aos critérios de Terzaghi para materiais drenantes a partir das escórias de aciaria. Entretanto, é necessário que as mesmas já atendam as faixas quando o material sai da siderúrgica, uma vez que o processo para obtenção das mesmas é trabalhoso e em muito oneraria a produtividade da obra se tivesse que ser feito em campo. Também pode-se afirmar que a condutividade hidráulica do material é adequada ao uso como estrutura de drenagem, porém cuidados com a cura prévia do material devem ser tomados uma vez que foi observada a ocorrência de finos no dreno longitudinal, que era composto unicamente de material grosso (#25 mm e #50 mm) e envelopado com uma manta geotêxtil.



## BIBLIOGRAFIA

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004. Resíduos Sólidos- Classificação Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.005. *Procedimento para Obtenção de Lixiviado de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.006. *Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos*, Rio de Janeiro, 2004.

CPRM (2006). Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. *Levantamento da Geodiversidade: Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil – Isoietas Anuais Médias – Período 1977 a 2006*. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.

DAS, B. (2007). *Fundamentos da engenharia geotécnica*. Thomson Pioneira. 561 p.

DNER (1994). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *DNER EM 260/94: Escórias de Alto Forno para Pavimentos Rodoviários*, Especificação de Material. 4p.

DNER (1994). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *DNER PRO 261/94: Emprego de Escórias de Alto Forno em Pavimentos Rodoviários*, Procedimento. 3p.

DNIT (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. *DNIT ES 015/2006: Drenagem – Drenos Subterrâneos*. Especificação de Serviço, IPR, Rio de Janeiro. 10p.

DNIT (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. *Álbum de Projetos-Tipo de Dispositivos de Drenagem*. 2a edição. Publicação IPR – 725, Rio de Janeiro. 103p.

DNIT (2006). Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. *Manual de Drenagem de Rodovias*. 2a edição. Publicação IPR – 724, Rio de Janeiro. 337p.

FERREIRA, C. R. C. D. P. (2008). *Desenvolvimento de um Equipamento Laboratorial para o Estudo de Problemas de Percolação em Modelo Reduzido*. Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2007/2008 – Departamento de Engenharia

Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

IABr (2009). *Processo Siderúrgico*. Publicação Instituto Aço Brasil. 1p. <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>. Acessado 16 de novembro de 2016.

IABr (2016). *Relatório de Sustentabilidade*. Publicação Instituto Aço Brasil. 49p. [www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/](http://www.acobrasil.org.br/sustentabilidade/). Acessado 29 de novembro de 2016.

MACHADO, A. T. (2000). *Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

MARCHEZINI *et al* (2016). *Estudo do Agregado Siderúrgico para Uso em Drenagem Profunda*. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais. 7p.

PIMENTA, C. F. (1981). *Curso de Hidráulica Geral*. 4 ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro. 482p.

RESENDE, A. D. (2010). *Utilização Da Escória De Aciaria Pura E Com Adição De Argila Como Camada De Base Em Pavimentação Rodoviária*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais.

ROHDE, L. (2002). *Escória De Aciaria Elétrica Em Camadas Granulares De Pavimentos - Estudo Laboratorial*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Porto Alegre.

SOUZA, G. M. (2007). *Estudo Experimental De Escórias De Aciaria Para Fins De Caracterização Tecnológica Como Material De Lastro Ferroviário Em Vias Sinalizadas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais.

STREETER, V. L. & WYLIE, E. B (1982). *Mecânica dos Fluidos*. McGraw-Hill, Rio de Janeiro. 584 p.

WHITLOW, R. (1995). *Basic Soil Mechanics*. Terceira Edição. McGraw-Hill, Rio de Janeiro.